Biotecnologie vegetali: tra rifiuto e accettazione

Fotografia di Flavio Faganello, 1984

Non è facile orientarsi nel dedalo delle informazioni - e disinformazioni - sugli organismi geneticamente modificati; questo articolo vuole offrire un contributo a una valutazione scientifica del problema

di Francesco Sala

Alcuni lo chiamano cibo di Frankenstein, e affermano che le piante transgeniche (etichettate collettivamente come ogm, ossia organismi geneticamente modificati o, più propriamente, piante gm) sono pericolose per la salute, attentano alla biodiversità del mondo vegetale e uccidono insetti come la farfalla monarca. Affermano anche che solo i paesi ricchi ne trarranno vantaggio, mentre i paesi poveri saranno ancor più asserviti alle multinazionali che producono le sementi. Il dissenso sulle piante gm tocca le amministrazioni comunali (vi sono Comuni che si definiscono «de-ingegnerizzati»), regionali (alcune Regioni italiane vietano la coltivazione di piante ingegnerizzate) e i Governi dell'Unione Europea (che proibiscono di coltivarle, ma non di importarle).

Ma non è così nel resto del mondo dove vi è una sostanziale accettazione. Tra i paesi più attivi nella ricerca e coltivazione di piante gm vi sono Stati Uniti, Canada e Sud America. Nel 1999 la coltivazione mondiale di piante transgeniche è aumentata del 43,5 per cento rispetto all'anno precedente arrivando a occupare 39,9 milioni di ettari di terreno, una superficie ben più grande dell'Italia intera. E, nei prossimi cinque anni queste cifre sono destinate ad aumentare vertiginosamente, dal momento che numerose piante transgeniche sono ormai pronte per la coltivazione in Cina e in India.

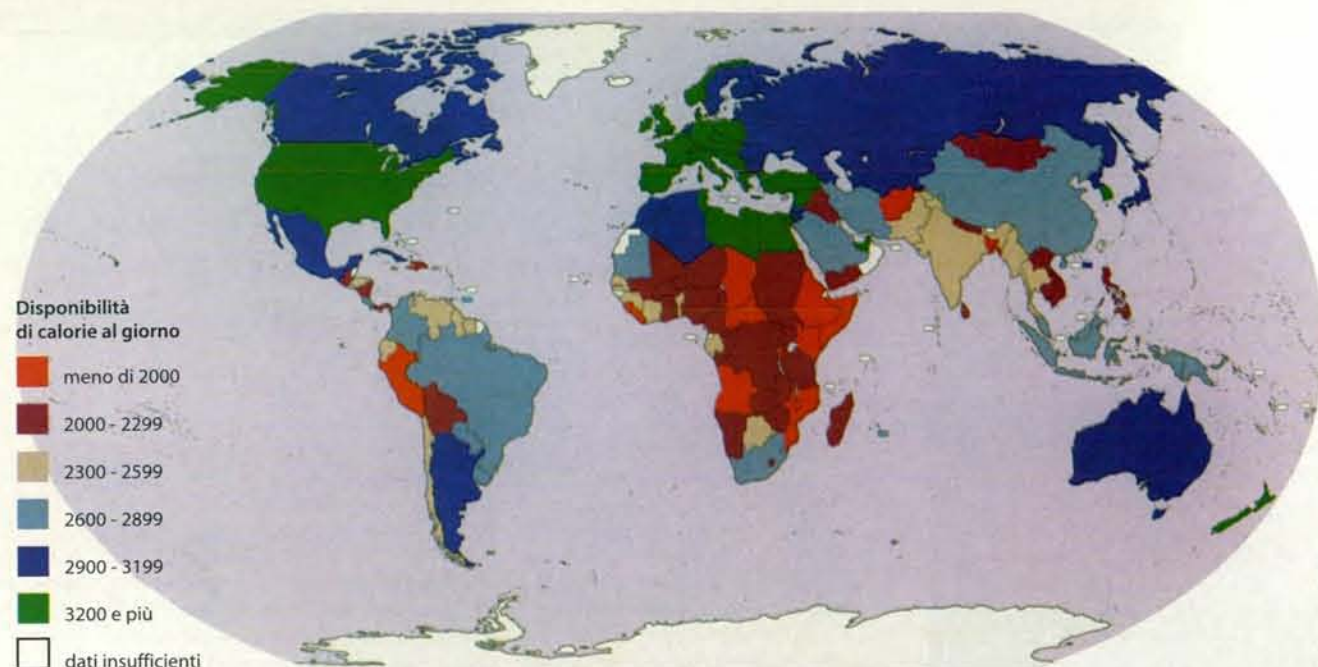
Nell'Unione Europea la ricerca nel settore è stata sinora molto attiva, specie nelle Università e nei centri di ricerca pubblici. L'Italia stessa ha sviluppato una notevole attività di ricerca applicata alla protezione e alla valorizzazione dell'agricoltura mediterranea. Tuttavia, in Europa, le licenze di coltivazione non vengono più accordate, le prove sperimentali controllate sono scoraggiate o addirittura distrutte, la superficie coltivata è ridotta a pochi ettari, tutti in Spagna e Portogallo.

Come si è arrivati alle piante transgeniche

Dall'inizio del secolo, due sono stati, essenzialmente, gli approcci al miglioramento genetico delle colture: l'incrocio tra piante sessualmente compatibili e la selezione di mutanti. Dal 1985, la scienza ne ha aggiunto uno nuovo basato sull'integrazione, nel genoma della pianta, di geni clonati da altri organismi viventi come piante non sessualmente compatibili, batteri, animali, funghi o virus. Quest'ultimo approccio è reso possibile dal fatto che il codice genetico è universale: non esistono strutture geniche specifiche per ciascun regno tassonomico. L'uomo è uomo non perché fatto da geni umani, ma perché l'insieme dei suoi geni ne determina il differenziamento in un organismo dalle caratteristiche umane. Tuttavia, un gene clonato dal genoma dell'uomo può essere trasferito ed espresso in un batterio, in un lievito o in una pianta. Per esempio, tutta l'insulina umana per uso medico è oggi prodotta da lieviti geneticamente modificati.

Per capire i vantaggi offerti dalle applicazioni del trasferimento genico nelle piante coltivate prendiamo per esempio il riso Carnaroli, una delle più apprezzate varietà coltivate in Italia.

Spaventapasseri a guardia di un campo di mais in Valsugana. L'agricoltura tradizionale e quella biologica hanno molti meriti, ma non potranno da sole sopperire ai fabbisogni alimentari della crescente popolazione mondiale.

Fonte: FAO/OMS

Questo riso ha un difetto: è sensibilissimo agli attacchi di un parassita fungino, la *Pyricularia oryzae*. Le perdite produttive possono raggiungere il 100 per cento, a meno che non si intervenga con prodotti chimici antifungini. L'incrocio del Carnaroli con una varietà resistente al fungo potrebbe dare una progenie con questa proprietà, ma non sarebbe più *il* Carnaroli, così come i nostri figli non sono identici a noi. In alternativa, si tenta da anni di selezionare mutanti resistenti al fungo, ma si è visto che questi favoriscono lo sviluppo di nuovi ceppi fungini patogeni.

L'ingegneria genetica è in grado di offrire un approccio più semplice e sicuro: infatti esistono in natura geni con proprietà antifungine. Tra questi il gene *B32* di mais, il gene *AFP* di *Aspergillus giganteus* e i geni della famiglia delle cecrosporine che esplicano azione fungicida nell'intestino degli insetti. Il trasferimento nel riso di uno o più di questi geni potrebbe renderlo resistente alla *Pyricularia* e inoltre impedirebbe lo sviluppo di nuovi ceppi fungini patogeni. Non è fantascienza. È un progetto dell'Unione Europea attualmente sviluppato presso l'Istituto di cerealicoltura di Bergamo.

Nella tabella a pagina 42 sono riassunte le attività di ricerca, i controlli e le analisi necessari per la produzione di piante transgeniche. È importante notare che si tratta del primo caso, nella storia dell'agricoltura, in cui c'è l'obbligo di analizzare tossicità ed effetti sull'ambiente delle nuove varietà. Ancora oggi, nell'agricoltura tradizionale e biologica ciò non è richiesto!

Presente e futuro delle piante transgeniche

Per ora sono ancora pochi i geni integrati nelle piante coltivate. Si tratta di geni che conferiscono resistenza a insetti, virus e diserbanti o che mantengono i frutti al giusto grado di maturazione. Ma siamo solo all'infanzia delle biotecnologie vegetali. Presto disporremo di una vasta batteria di promotori e di geni che, grazie a metodologie di trasferimento genico semplificate, permetteranno le più diverse applicazioni.

Restando nel settore riso, già abbiamo geni che permettono l'accumulo, nel seme, di vitamine, di ferro o di composti di notevole interesse farmaceutico e altri ancora che eliminano le proprietà allergeniche. Nel prossimo futuro ogni nazione sarà in grado di clonare e utilizzare geni di suo interesse. Sia la Cina che l'India hanno incrementato i finanziamenti pubblici per la ricerca di base proprio allo scopo di produrre nuovi geni per piante gm.

Per quanto riguarda i promotori, ossia le sequenze di DNA che accendono il gene così come un interruttore accende una lampadina, bisogna distinguere tra promotori costitutivi (gene sempre attivato) e inducibili (gene attivato solo in risposta a uno stimolo quale luce, freddo, siccità o lesioni). La maggior parte dei geni negli organismi superiori è controllata da promotori inducibili.

Le piante gm oggi coltivate hanno transgeni con promotori costitutivi. Per esempio, è costitutivo il promotore 35S del mais-*Bt* (dal nome del *Bacillus thuringiensis*). Ciò permette di esprimere il gene con alta efficienza, ma questo a volte non è raccomandabile. Nel caso del mais-*Bt* stesso, la produzione continua della tossina-*Bt* potrebbe determinare la scomparsa dell'insetto bersaglio, con conseguenze per la biodiversità, oppure potrebbe favorire la selezione di insetti resistenti. Ciò è stato documentato per gli insetticidi a base di spore di *B. thuringiensis* in coltivazioni «biologiche» (ma non ancora in coltivazioni di piante-*Bt*).

Il prossimo futuro è dunque nei promotori inducibili. Si stanno isolando promotori che attivano i geni in seguito a infezione da parassiti, in dati stadi di sviluppo della pianta o in particolari tessuti (per esempio, nel fiore o nella radice).

Le metodologie di trasferimento genico sono già oggi semplici e poco costose. Le più usate sono quelle basate sulla infezione con *Agrobacterium tumefaciens* o sul bombardamento con particelle accelerate. Tuttavia, molte piante di interesse agrario sono ancora refrattarie alla trasformazione genetica. È verosimile che in un prossimo futuro le metodologie saranno ulteriormente semplificate con il risultato che presto qualsiasi laboratorio di biotecnologie vegetali in qualsiasi paese del mondo sarà in grado di integrare geni in piante di interesse locale.

Abbiamo elencato in tabella alcuni dei benefici già attualmente percepibili o promessi per il prossimo futuro dalle piante gm. Come si vede, la produzione di cibo non sarà assolutamente l'unico sbocco di questa tecnologia. Anzi, la previsione è che, tra 15-20 anni, la maggioranza delle applicazioni sarà in altri settori. In Cina, il pioppo-*Bt*, resistente agli insetti, produrrà legname già dal prossimo anno. E vi saranno applicazioni in molti altri settori, come quelli connessi alla sintesi di composti di interesse chimico e farmaceutico. È già stato brevettato un riso-*Bt* capace di produrre albumina del siero umano, alfa-1-antitripsina e antitrombina III, proteine oggi prodotte da cellule umane in coltura. I geni per la loro sintesi, dotati di promotore della alfa-amilasi, permettono la produzione delle proteine corrispondenti nell'endosperma dei semi in germinazione. «È come fare la birra» recita il testo del brevetto.

La produzione di vaccini in pianta è

Benefici derivanti dall'impiego di piante transgeniche

Per la salute umana:

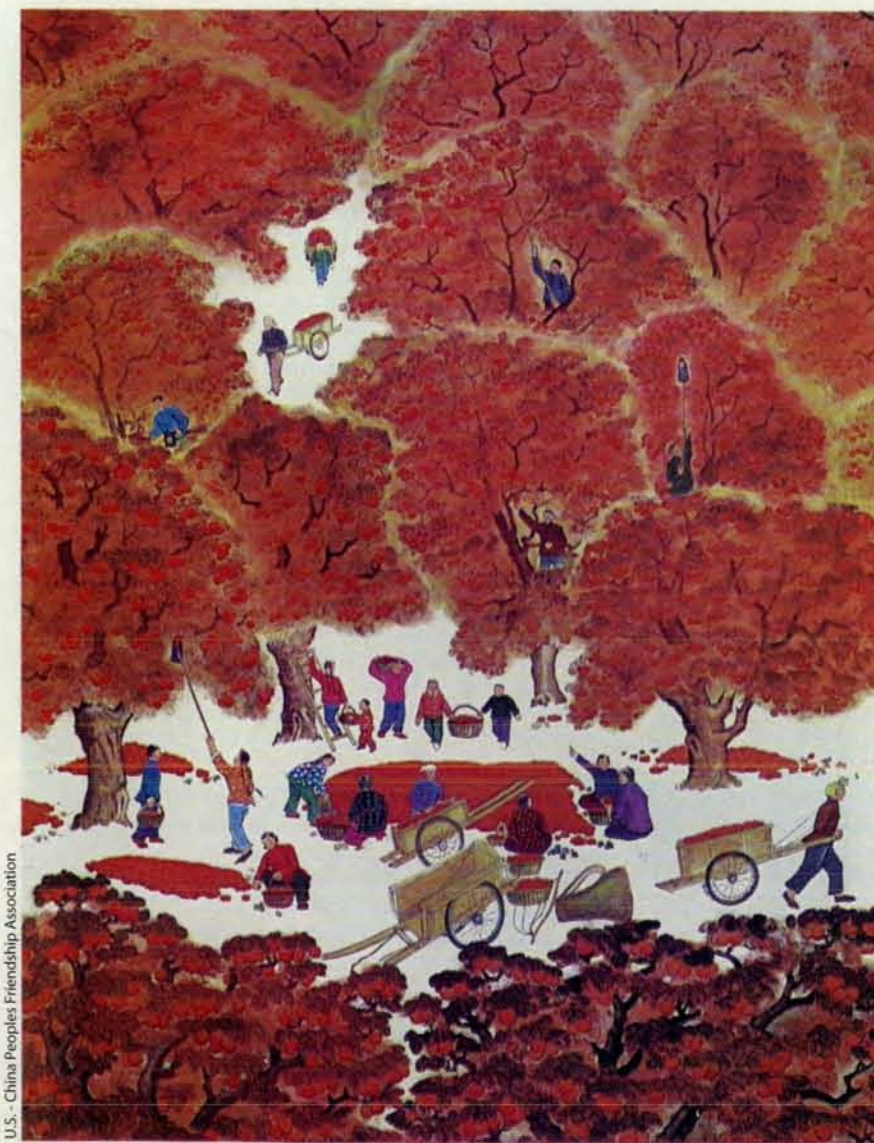
- Eliminazione dai prodotti alimentari dei residui di insetticidi, fungicidi e altri fitofarmaci
- Eliminazione di componenti che provocano allergie nel consumatore
- Riduzione dei livelli di contaminazione dei cibi con tossine e aflatossine fungine
- Sostituzione dei diserbanti attualmente usati nelle grandi colture con diserbanti biodegradabili nel terreno
- Salvaguardia delle varietà vegetali di pregio messe a rischio da stress colturali (infezioni da insetti, fungine, virali)

Per l'ambiente:

- Più rispetto per la biodiversità della fauna grazie al risparmio di fitofarmaci
- Utilizzo di piante per fabbricare prodotti chimici e farmaceutici attualmente ottenuti industrialmente

Per i paesi poveri:

- Resa più elevata per unità di superficie
- Piante resistenti a stress biotici (parassiti) e abiotici (siccità, salinità, temperatura)
- Piante con migliorate capacità nutrizionali (più vitamine, ferro, amminoacidi)

In Cina l'agricoltura ha sempre avuto un grande sviluppo e si è costantemente cercato di aumentarne la produttività. Il dipinto in basso, di Wen Chih-chiang, intitolato *Il giardino della nostra Comune* (1975) è un esempio dei risultati raggiunti con sistemi tradizionali. Ora il paese punta molto sulle biotecnologie per migliorare la redditività non solo dei prodotti alimentari, ma anche di quelli per l'industria. Le foglie di pioppo a lato mostrano i vantaggi dell'inserimento del gene-*Bt* per la resistenza agli insetti.

U.S. - China Peoples Friendship Association

un'altra area di enorme interesse per i paesi poveri. Saranno anche economicamente vantaggiose le applicazioni alle piante ornamentali, a cui si potranno conferire nuove forme e diversi colori.

Quali rischi dalle piante gm?

Prima di affrontare lo scottante argomento dobbiamo fare una premessa: agricoltura non è natura. Da quando è nata, ma soprattutto nell'ultimo secolo, agricoltura significa distruzione di foreste e di luoghi naturali per far posto ai campi, riduzione della biodiversità, sovvertimento degli equilibri biologici, inquinamento ambientale.

L'aumentata coscienza di tutto ciò ci porta oggi a cercare di limitare gli aspetti negativi dell'agricoltura intensiva. Le piante transgeniche non sfuggono a questa comune esigenza e possono essere progettate per risolvere alcuni problemi tradizionali. Tuttavia, il messaggio che arriva all'opinione pubblica europea è che le piante gm sono troppo pericolose e, quindi, inaccettabili. È davvero così?

Dobbiamo ammettere che non esiste tecnologia esente da rischi. Accettiamo un'innovazione quando riteniamo che i rischi siano inferiori ai benefici. Così è per gli aerei e per le automobili, che pure sono causa di migliaia di morti all'anno, o per la penicillina che salva milioni di vite, anche se, qualche volta, uccide per shock anafilattico. Non sfugge a questa regola l'agricoltura: può avvelenarci e inquinare l'ambiente con fitofarmaci e fitoregolatori, scatenare allergie, trasmetterci veleni e tossine fungine, ridurre la biodiversità naturale. L'agricoltura «biologica» è esente dal primo di tali pericoli, non certo dagli altri. Il fatto è che i rischi dell'agricoltura sono considerati accettabili in rapporto ai benefici.

Perché dunque si pretende che solo le piante transgeniche siano assolutamente esenti da rischi? Una proposta sensata mi sembra quella che stabilisca che il massimo livello di rischio accettabile per tale tipo di piante sia lo stesso delle piante tradizionali. Potremmo anche chiedere alle nuove tecnologie di abbassare questo livello, ma è utopistico pretendere che le piante transgeniche siano assolutamente innocue!

Ma vediamo quali sono le accuse

Cortesia Novartis

Casi clamorosi

Foto Elenar Bentall/FSP/Gamma

In alto, cristalli di proteina Bt prodotta in natura da *Bacillus thuringiensis*. A sinistra, Arpad Pusztai, il ricercatore britannico che scatenò la polemica sulla tossicità delle patate transgeniche. A destra, manifestazione organizzata da Greenpeace per protestare a favore della farfalla monarca la cui sopravvivenza sembrava minacciata dal polline del mais-*Bt*. Sotto, disegno di una fragola contenente un gene di pesce artico, emblema di una campagna della Coop.

Cortesia Greenpeace

Il «caso Pusztai» (1998)

Arpad Pusztai, del Rowett Research Institute di Aberdeen, in Scozia, aveva analizzato piante di patata ogm dotate del gene *GNA* di bucaneve (*Galanthus nivalis*) che codifica per una lectina che difende il bulbo della pianta da insetti parassiti. Nutrendo alcuni topi con queste patate, Pusztai aveva osservato rallentamento della crescita e depressione del sistema immunitario. Questi risultati, molto pubblicizzati, indussero il Governo del Regno Unito a bloccare la coltivazione di tutte le piante geneticamente modificate.

Tuttavia, i risultati di Pusztai possono essere sottoposti a critiche: i topi erano stati alimentati con patate crude, ma è noto che queste già contengono sostanze antinutritive (lectine e solanine) la cui tossicità si annulla solo con la cottura; nella patata ogm sono state trovate modifiche nel contenuto in proteine, amido, zuccheri e in altri parametri. Per qualche ragione non approfondita adeguatamente la patata transgenica non era quindi equivalente a quella usata come controllo: la tossicità verificata da Pusztai nella patata ogm poteva essere dovuta a un maggior contenuto di sostanze antinutritive endogene.

Allarme tumori (1999)

Sempre nel Regno Unito M. W. Ho e collaboratori della Open University hanno denunciato il fatto che la sequenza del promotore 35S, clonata dal virus del mosaico del cavolfiore potrebbe passare dal cibo ogm al genoma umano provocando tumori o altri disastri metabolici. La tesi è stata adottata anche dai sostenitori di Pusztai, i quali, constatata l'incompletezza delle prove sulla tossicità del gene, hanno proposto che non sia il gene stesso a essere nocivo per i topi, bensì il suo promotore 35S. Le conclusioni dei ricercatori della Open University sono drastiche: raccomandano che siano ritirate dal commercio tutte le piante contenenti promotori virali, la quasi totalità di quelle coltivate nel mondo!

Ogni giorno mangiamo verdure e frutti infettati da virus. Ingeriamo quindi miliardi di geni virali con il promotore 35S. Allora anche mangiare è pericolosissimo? In verità i virus vegetali non sono assolutamente patogeni per gli animali, uomo compreso. Altrimenti gli animali, soprattutto quelli erbivori, sarebbero estinti da tempo!

La farfalla monarca (maggio 1999)

In un articolo apparso su «Nature», J. E. Losey e suoi collaboratori della Cornell University affermarono che il polline del mais-*Bt* è tossico per la farfalla monarca (*Danaus plexippus*). Secondo gli autori, le farfalle cresciute per quattro giorni in presenza di polline-*Bt*, mangiano meno, crescono più lentamente e hanno una mortalità maggiore rispetto a quelle cresciute in presenza di polline normale.

Queste conclusioni sono però messe in serio dubbio dalle modalità della sperimentazione: essa è stata condotta solo in laboratorio; alla farfalla è stata data, come dieta obbligatoria, un'erba (*Asclepias curassavica*) su cui era depositato polline di mais, ma il dosaggio del polline è stato effettuato con una spatola, quindi con un largo margine di errore; il mais usato come controllo (non gm) apparteneva a una varietà diversa da quella del mais-*Bt*, quindi avrebbe potuto essere dotato di effetti tossici diversi.

Ma non è finita. La parte poco nota di questa storia è che dati più recenti ottenuti sul campo hanno dimostrato che in quella vasta zona degli Stati Uniti in cui da più di sei anni si coltiva la maggior parte del mais-*Bt*, la popolazione di farfalla monarca è aumentata più di sei volte. L'aumento è stato confermato anche dal conteggio delle farfalle che ogni autunno migrano verso il Messico.

In definitiva, non è vero che la farfalla monarca sia a rischio di estinzione, sta anzi meglio perché nelle coltivazioni di mais-*Bt* è drasticamente ridotto l'uso di insetticidi, ha a disposizione una dieta varia e può evitare un cibo non gradito come il polline di mais. Inoltre, anche se tossico, il polline-*Bt* perde l'attività insetticida in pochi giorni, a causa dei raggi solari, e nella maggior parte delle zone di coltivazione del mais la larva sfarfalla in un periodo successivo alla maturazione del polline. Peccato che questi ultimi dati non siano mai assurti all'onore dei mass media.

Cortesia Coop

Tossina-*Bt* e insetti (dicembre 1999)

In un altro articolo apparso su «Nature» D. Saxena e collaboratori della New York University hanno affermato che le radici di mais-*Bt* liberano nel suolo la tossina-*Bt*, mettendo a rischio la sopravvivenza degli insetti. Gli autori però hanno precisato che la tossina permane nel suolo se questo è stato sterilizzato, ma che in un suolo non sterile è idrolizzata da proteasi prodotte dai microrganismi del suolo o dalle radici stesse del mais. L'articolo quindi non offre una dimostrazione conclusiva della pericolosità della tossina per gli equilibri biologici del suolo. Comunque, se esiste, questo rischio sarà del tutto evitato con l'uso di promotori inducibili da ferita.

mosse alle piante geneticamente modificate: effetti tossici sull'uomo, danni per l'ambiente, inutilità per i paesi ricchi, incapacità di risolvere il problema della fame nel mondo, pericolosa gestione commerciale. È evidente che molti dei rischi loro attribuiti sono comuni alle altre piante coltivate, però le piante transgeniche hanno un potenziale fattore di rischio in più, il gene esogeno. Qual è la sua pericolosità?

Cominciamo dai dubbi relativi alla salute dell'uomo. Le piante transgeniche vengono accusate di scatenare allergie alimentari. In realtà, già oggi, in tutto il mondo, il 2-4 per cento dei bambini e l'1-2 per cento degli adulti soffre di allergie scatenate da proteine contenute nel cibo, soprattutto soia, latte vaccino, uova, farina, riso, noci, arachidi, pesci e crostacei. L'unica cura efficace è evitare il cibo cui si è allergici.

Nel caso delle piante transgeniche, il gene esogeno potrebbe effettivamente codificare per una proteina allergenica, ma le legislazioni dei diversi paesi prevedono che si analizzino preventivamente: la fonte del gene (è derivato da un organismo che dà allergie?); i parametri fisico-chimici della proteina specificata dal gene (somiglianza con proteine allergeniche, stabilità alla digestione e alla cottura); gli effetti del gene esogeno sulla produzione degli allergeni endogeni della pianta ospite; i risultati di saggi *in vitro* (RAST, ELISA) e *in vivo* (test cutanei, simulazione alimentare).

L'efficacia dei controlli è dimostrata dal caso - molto pubblicizzato - di una varietà di soia in cui era stato integrato un gene di noce brasiliana codificante per l'albumina 2S. La soia risultava migliorata dal punto di vista nutrizionale, ma aveva acquisito le proprietà allergeniche dell'albumina. In base alle analisi è stato negato il permesso di coltivazione.

Al contrario, le piante gm possono addirittura essere progettate per ridurre il potenziale allergenico degli alimenti. A tale scopo si applica la metodologia del «gene antisenso»: scoperto il gene responsabile dell'attività allergenica di una pianta, lo si costruisce con la sequenza di basi invertita e lo si integra nel genoma della pianta. Il gene antisenso annullerà l'attività del gene senso. Con questo approccio è già stato prodotto riso non allergenico.

Per quanto riguarda la resistenza agli antibiotici, in effetti tutte le piante gm oggi coltivate sono dotate, oltre che del gene di interesse, anche di un gene che conferisce resistenza agli antibiotici neomicina, kanamicina e derivati. La ragione è semplice. Quando si inserisce un gene in una cellula vegetale, si ottiene una cellula transgenica in mezzo a migliaia di cellule normali. Occorre rigenerare una pianta proprio a partire dalla cellula che ha acquisito il gene, il che si ottiene coltivando le cellule in presenza dell'antibiotico che distrugge le cellule sensibili.

Questa procedura ha fatto pensare che il gene per la resistenza possa trasferirsi dalla pianta ai batteri dell'intestino, o peggio al genoma umano, rendendo quindi inefficace un'eventuale terapia con quell'antibiotico (oggi comunque privo di interesse clinico). L'accusa manca di realismo scientifico: il fatto che un gene presente in un vegetale, e dotato, si badi, di un promotore vegetale inattivo nei batteri, possa essere trasferito ai batteri del nostro intestino, e da questi passare a batteri patogeni, ha la stessa rilevanza che può avere l'aggiunta di un bicchiere d'acqua sul livello del mare. Infatti, esistono nel nostro intestino centomila miliardi di batteri, mentre la frequenza di mutazione naturale per la resistenza a un antibiotico è di circa uno su dieci milioni. Possiamo quindi calcolare che, in ogni momento, nel nostro intestino vi siano milioni di batteri resistenti alla neomicina. Un altro gene trasferito dal vegetale gm si sommerebbe, semplicemente, ad essi. Comunque, tutti questi geni prenderebbero il sopravvento nella popolazione batterica solo se vi fosse la spinta selettiva determinata dalla somministrazione dell'antibiotico.

Sappiamo che spesso i medici abusano di antibiotici, ma è meno noto il fatto che il 50 per cento degli antibiotici oggi prodotti nel mondo è usato nell'alimentazione animale. Con tale trattamento gli animali crescono meglio, ma

Cortesia Fratelli Ingegnoli S.p.A.

Il pomodoro S. Marzano è minacciato dal virus CMV. La ricerca italiana ha già approntato un pomodoro gm immune dalla malattia, ma la sua produzione è bloccata.

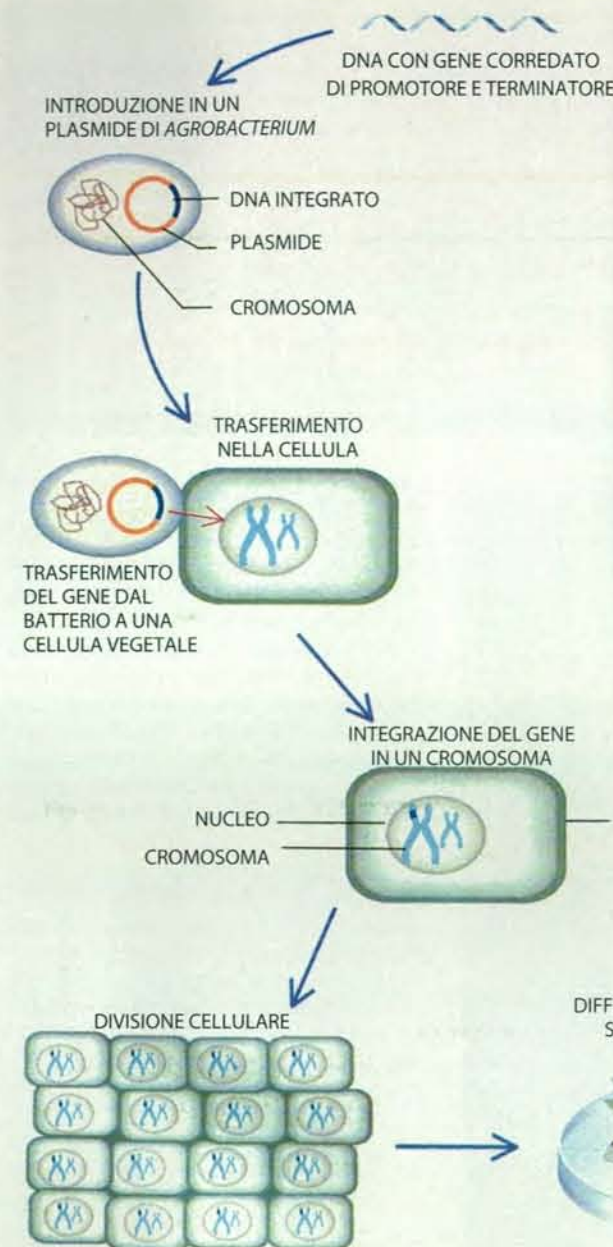
Il problema dei brevetti

Il dibattito su questo argomento è certo utile in quanto serve ad assicurare che il brevetto non perda il suo significato, che è quello di agire da volano dello sviluppo, attraverso la stimolazione dell'inventiva, e si trasformi, invece, in un mezzo per creare monopoli.

Brevettare significa ottenere la protezione intellettuale di una invenzione. Ciò è vero fin dai tempi della Repubblica Veneta, ove i brevetti furono introdotti allo scopo di stimolare il commercio, proteggendo economicamente l'inventore. In definitiva, il brevetto è l'unico mezzo che il piccolo inventore ha per proteggere le sue scoperte. Al limite potremmo dire che le grandi società multinazionali non hanno bisogno di brevetti: si proteggono meglio con i monopoli. È dunque opportuno mettere un limite all'inventiva quando si tratti di piante geneticamente modificate?

È infine fondamentale ricordare che brevetto non vuol dire licenza di coltivazione delle piante geneticamente modificate. Questa è una facoltà successiva e indipendente che il potere pubblico può concedere o negare. La licenza dipenderà da mille considerazioni, tra cui una valutazione dei rischi o, più semplicemente, dell'opportunità.

Cortesia Novartis

Laurie Grace

Un laboratorio per la ricerca di nuove piante transgeniche. A sinistra, schema di una delle tecniche per ottenere piante geneticamente modificate, utilizzando come vettore un plasmide batterico.

sono contaminati da una flora batterica selezionata per la resistenza agli antibiotici. Tutte le carni crude o insaccate convogliano nel nostro intestino i batteri contenenti geni di resistenza.

Comunque, l'uso di antibiotici per la selezione di piante gm è oggi superato da approcci più moderni come la crescita delle cellule transgeniche in zuccheri che esse possono utilizzare selettivamente o altro.

Quanto al rischio che il gene di resistenza o altri geni esogeni passino dalla pianta gm al genoma umano, basti pensare che ogni giorno il nostro intestino è esposto a miliardi di genomi assunti con l'alimentazione. Si sa che il DNA si mantiene integro, ma non attivo, nell'intestino per alcune ore prima di essere digerito; in effetti, se cerchiamo un gene di bue o di mela nelle nostre cellule non lo troviamo.

Le possibilità d'incrocio

Un'altra preoccupazione molto sentita riguarda la diffusione del polline e dei semi nell'ambiente. In effetti molte piante in natura sono sessualmente compatibili con piante transgeniche e vi è quindi la possibilità che il loro polline possa fecondarle trasferendovi il gene esogeno. Ciò sarebbe deleterio nel caso di geni *terminator*, che causano sterilità o di geni di resistenza agli erbicidi. Quest'ultimo è un evento già verificatosi negli Stati Uniti dove è stato necessario ricorrere alla sostituzione dell'erbicida a causa della comparsa di erbe infestanti resistenti a esso.

Le condizioni per cui piante transgeniche indesiderate possono comparire e sopravvivere nell'ambiente naturale o in campi coltivati sono tre e non facili da trovarsi contemporaneamente. Intanto il polline dev'essere in grado di spostarsi a opportuna distanza. Nel caso del mais è documentato che la maggior parte del polline cade entro pochi metri, e solo di rado può allontanarsi di alcuni chilometri; nel riso questa distanza è sempre di pochi centimetri. Deve poi esistere, nel raggio di distribuzione del polline, una pianta sessualmente compatibile che, inoltre, acquisisca con il gene un vantaggio selettivo rispetto alla popolazione esistente.

Ma vi sono strategie per evitare la diffusione del gene esogeno attraverso il polline. Si può infatti scegliere tra: integrazione del gene esogeno nel DNA del cloroplasto e non in quello nucleare (la maggior parte delle piante coltivate trasmette i cloroplasti esclusivamente per via materna, quindi il polline non sarà gm); l'utilizzo di piante rese maschio-sterili (l'approccio, ovviamente, non è utilizzabile nel caso di piante da seme, ma sarebbe l'ideale per piante che si riproducono per talea come il pioppo, la canna da zucchero, il banano); il rilascio del permesso di coltivazione solo in zone abbastanza distanti da piante sessualmente compatibili con la pianta gm. Per esempio, si sa che vi sono piante sessualmente compatibili con il mais in alcune zone del Sud America, ma non in Europa.

È dunque importante che le conseguenze della diffusione del polline transgenico nell'ambiente vengano attentamente valutate, ma sarebbe utile che queste precauzioni venissero prese anche nel caso di piante non transgeniche. Per esempio, nella Pianura Padana la sopravvivenza del pioppo naturale è messa in serio pericolo dal pioppo coltivato che, con il suo polline, sposta gli equilibri naturali verso le piante ibride.

È anche possibile, in via teorica, la diffusione indesiderata di piante transgeniche nell'ecosistema attraverso la dispersione dei semi. Tuttavia, è documentata la scarsa o nulla capacità delle piante coltivate di competere con piante già selezionate in natura.

Esaminiamo ora i rischi in relazione alla biodiversità, senza però confondere piante naturali e coltivate. Le prime sono messe in pericolo dall'urbanizzazione e dalle altre attività umane, inclusa la trasformazione di foreste in terreni agricoli. Ma quanta colpa di ciò è attribuibile alle biotecnologie vegetali? Non vi è nulla nel concetto di piante gm che le renda nemiche della biodiversità naturale. Al contrario, il fatto che esse promettano un maggior raccolto per unità di superficie fa ritenere che la loro diffusione possa restituire terreni agricoli alle foreste. Della seconda biodiversità, quella limitata ai prodotti commerciali, ci si rende conto quando, per esempio, si osserva che, mentre una volta si disponeva di più di 200 varietà di mele, ora la scelta è ridotta a 3 o 4. Ma, anche in questo caso, sono esigenze di mercato a minare la diversità, non certo le biotecnologie che, casomai, aumentano le possibilità di scelta.

Cortesia Novartis

In alto, campo sperimentale dove si coltiva mais-*Bt* (*a sinistra*) e mais non *Bt*. Il secondo è stato gravemente danneggiato dalla piralide, un insetto la cui larva divora il fusto della pianta.

Il problema della qualità

Questo è un argomento che riguarda da vicino il nostro paese che ha sempre prodotto vegetali di alta qualità. Ma quale tipo di agricoltura può assicurare sopravvivenza e competitività al prodotto pregiato? L'agricoltura tradizionale, quella biologica o quella biotecnologica? La realtà è che non esiste una strategia che abbia tutte le soluzioni in tasca. È errato pensare che l'agricoltura biologica possa risolvere tutti i problemi, così come è errato pensare che lo facciano le biotecnologie. La cooperazione potrà moltiplicare i vantaggi. L'agricoltura biologica intende eliminare la fertilizzazione chimica del suolo e gli interventi chimici di protezione della pianta. Ma rimane il problema che frequentemente le piante tradizionali hanno difetti genetici: sono sensibili a insetti, funghi, virus, gelo, siccità, sale. Le biotecnologie possono introdurre un gene che corregga i singoli difetti, mantenendo inalterate le qualità organolettiche del prodotto. Con piante così corrette avremmo genotipi ottimali per l'agricoltura biologica. La produttività sarebbe mantenuta a livelli accettabili mentre sarebbe ridotta la produzione di tossine e aflatossine da parte dei funghi che parassitano le piante sotto stress.

Un esempio di interazione positiva tra un prodotto di qualità e biotecnologie è rappresentato dal pomodoro S. Marzano. Questa vera e propria gloria nazionale potrebbe presto sparire dalle nostre mense perché un virus, il CMV, distrugge oggi sino al 40 per cento del raccolto. Il problema è già stato affrontato dalla ricerca italiana integrando nel DNA del pomodoro, in orientamento «antisenso», una sequenza del virus che codifica per la proteina dell'involucro. Il S. Marzano esente da infezioni virali è già pronto, ma è stato bloccato proprio perché transgenico!

Un secondo esempio: la coltivazione del melo tipico della Valle d'Aosta è messa a rischio dalle larve di un insetto, *Melolontha melolontha*, che, mangiando le giovani radici, impedisce la messa a dimora di nuovi impianti. Anche in questo caso, entro pochi anni questa coltivazione, con tradizioni secolari, diverrà un ricordo. Si può rimediare sfruttando il fatto che il melo è costituito da una porzione radicale (il portainnesto) e da una aerea (la varietà che produce il frutto). Integrando un gene *Bt* nel portainnesto, preferibilmente con promotore inducibile da ferita, si otterrebbero radici resistenti all'insetto, mentre la parte aerea resterebbe quella della pianta tradizionale.

Chi teme effetti negativi e inaspettati dalle biotecnologie parla della possibilità che il gene esogeno interferisca con il resto del genoma. In realtà, da un punto di vista scientifico, è senz'altro più prevedibile il comportamento di un gene isolato, caratterizzato e trasferito in una pianta, rispetto a un mutante ottenuto per mutagenesi chimica o per radiazioni, o a un nuovo ibrido ottenuto incrociando due piante.

L'integrazione del gene esogeno avviene, per ora, in siti apparentemente casuali del genoma vegetale e quindi si teme che ciò possa scatenare inattivazione di geni utili o attivazione di trasposoni. Ma si dimentica di dire che tali fenomeni avvengono naturalmente e spesso nelle piante, sia in seguito a stress biologici, climatici o di altra origine, sia durante le operazioni di miglioramento genetico tradizionale.

Quale agricoltura per il futuro del mondo?

La popolazione mondiale aumenta, mentre la terra coltivabile diminuisce a causa delle crescenti siccità, salinità, urbanizzazione. Dopo il 2030 è previsto il tracollo: anche assumendo una distribuzione equanime dei prodotti, tutta la superficie coltivabile non sarà più in grado di produrre sufficiente cibo per gli 8-9 miliardi di persone previsti.

Non vi saranno alternative: ogni appezzamento di terreno coltivabile dovrà produrre il doppio di quanto oggi faccia. E ciò dovrà avvenire nel rispetto dell'ambiente e con minor ausilio della chimica (insetticidi, diserbanti, fungicidi, fertilizzanti, fitofarmaci).

Dovremo dotarci di piante capaci di crescere in suoli aridi e salini, resistenti a insetti, funghi e virus patogeni, più efficaci nello sfruttare i fertilizzanti naturali e le simbiosi con i microrganismi del suolo. Sappiamo però che il miglioramento genetico tradizionale basato su incroci, mutazioni e uso di ibridi ad alta produttività, non può offrire soluzioni realistiche a breve termine. Questa sfida potrà forse essere vinta se a queste metodologie si affiancherà il trasferimento genico e se i paesi asiatici e africani saranno in grado di produrre e gestire le piante di loro interesse.

È del tutto evidente che, se i rischi delle piante geneticamente modificate sono quelli descritti dalla letteratura scientifica, non vi sono elementi per chiedere una moratoria globale sulla sperimentazione in campo e sulla coltivazione di questo tipo di piante. Certo si dovranno sviluppare strategie di coltivazione che evitino la diffusione dei geni esogeni e che riducano gli effetti sugli equilibri ecologici. Per esempio, le nuove piante gm resistenti agli insetti dovranno dare la preferenza a promotori inducibili che limitino l'espressione del gene al momento in cui l'insetto intacca i tessuti. Per il mais-*Bt* sarà auspicabile l'attuazione, in anni successivi, della rotazione di piante-*Bt* con piante-non-*Bt*. Per il pioppo-*Bt* basterà coltivare popolazioni miste per ridurre le larve senza farle scomparire.

Ma in verità, nel dibattito sulle piante gm, siamo di fronte a una situazione molto complessa in cui solo una piccola parte è giocata dalla scienza. Gli argomenti scientifici sono messi troppo spesso in secondo piano da problemi culturali, politici e psicologici. Per ora si è già ottenuto l'effetto di bloccare la ricerca scientifica in Europa, soprattutto quella pubblica. Chi dunque si occuperà della ricerca di base sui geni e di biosicurezza? Lasceremo tutto in mano alla ricerca extra-europea?

Tutti i controlli necessari

- 1. Identificazione, isolamento e caratterizzazione del gene e di opportuni segnali di espressione
- 2. Costruzione di una molecola di DNA vettore (plasmide o DNA lineare), che contenga il gene con i suoi segnali di espressione, e moltiplicazione della molecola stessa nel batterio *Escherichia coli*
- 3. Integrazione del gene e dei segnali di espressione in una cellula del vegetale prescelto
- 4. Selezione di cellule transgeniche, rigenerazione di piante gm e produzione di progenie (per seme o per talea)
- 5. Analisi molecolare delle piante gm (integrazione stabile del gene nel DNA cellulare, sua trascrizione in mRNA ed, eventualmente, traduzione in una proteina)
- 6. Prove sperimentali in serra (espressione del gene e prime verifiche agronomiche)
- 7. Prove sperimentali in campi controllati (verifica delle caratteristiche agronomiche, inclusa quella conferita dal gene esogeno)
- 8. Analisi della tossicità del prodotto, di eventuali proprietà allergeniche e del suo impatto ambientale
- 9. Coltivazione in campo su larga scala
- 10. Commercializzazione del prodotto

In tutto il mondo, i punti dal 7 al 10 sono soggetti ad autorizzazione preventiva da parte dei Governi.

FRANCESCO SALA dopo la laurea in farmacia e in scienze biologiche all'Università di Pavia ha trascorso tre anni come ricercatore negli Stati Uniti e in Canada. Tornato in Italia, ha lavorato alle Università di Pavia, Parma e Milano dove è attualmente ordinario di botanica e biotecnologie vegetali. Ha in corso varie collaborazioni internazionali tra cui programmi per il miglioramento del riso e del pioppo con la Cina e della canna da zucchero con Cuba.

KAPPELY O. e AUBERSON L., *How Safe is Safe enough in Plant Genetic Engineering* in «Trends in Plant Science» 3, 276, 1998.

HENRY D., *Environmentally Friendly Approaches to Genetic Engineering* in «Vitro Cell. Dev. Biol.» 35, pp. 361-368, 1999.

HO M. W., RYAN A. e CUMMINS J., *Cauliflower Mosaic Viral Promoter - A Recipe for Disaster* in «Microb. Ecol. in Health and Disease» 11, 1, 1999.

LOSEY J. E., RAYOR L, CARTER M. E., *Transgenic Pollen harms Monarch Larvae* in «Nature» 399, 214, 1999.

SAXENA D., FLORES S., STOTZKY G., *Insecticidal Toxin in Root Exudates from Bt Corn* in «Nature» 402, 480, 1999.

YE X. e altri, *Engineering the Provitamin A (B-Carotene) Biosynthetic Pathway into (Carotenoid-free) Rice Endosperm* in «Science» 287, pp.303-305, 2000.

La tecnologia per produrre plastica partendo dalle piante, anziché da combustibili fossili non rinnovabili, è ormai una realtà. Ma questi materiali nuovi sono davvero quei salvatori dell'ambiente che gli scienziati speravano?

di Tillman U. Gerngross e Steven C. Slater

quanto sono verdi le plastiche verdi?

Ideazione di Tom Draper

Nello Iowa centrale un coltivatore sta percorrendo in macchina una strada sterrata. Dietro si lascia una nuvola di polvere, mentre il suo sguardo segue fino all'orizzonte, a perdita d'occhio, i filari di mais, piante alte e piene di foglie che si muovono al soffio della brezza. Sorride fra sé e sé: la gente non lo sa, ma nei campi non ci sono solo i chicchi delle sue pannocchie. In quei fusti e in quelle foglie stanno crescendo granuli di plastica.

Quest'idea idillica - poter coltivare la plastica - sembra molto più attraente rispetto a fabbricarla negli impianti petrolchimici, che nel mondo consumano ogni anno circa 270 milioni di tonnellate di petrolio e gas. I combustibili fossili forniscono infatti, oltre all'energia, anche le materie prime per fare polistirene, polietilene, polipropilene e altri materiali polimerici comuni. Dalle bottiglie di molte bevande ai tessuti e a molti componenti delle auto, sarebbe proprio difficile immaginare la vita d'ogni giorno senza di essi; eppure da anni vengono sempre più chiamati in causa per gli effetti ambientali della loro produzione. Per quanto se ne sa, le riserve di petrolio si prosciugheranno in un'ottantina d'anni, il gas naturale finirà circa dieci anni prima, mentre il carbone durerà ancora sette secoli; ma le conseguenze economiche del loro esaurirsi potrebbero farsi sentire molto in anticipo: quando le risorse diminuiscono, i prezzi salgono, e i politici lo sanno. Il presidente Clinton nell'agosto 1999 diramò una direttiva per la ricerca scientifica, in cui chiedeva sforzi per la sostituzione progressiva dei combustibili fossili con prodotti agricoli, tanto nel settore dei carburanti quanto in quello delle materie prime industriali.

Assillati da questo problema, i ricercatori dediti, come noi due, alla bioingegneria furono entusiasti della scoperta di un metodo per far produrre plastica alle piante. A prima vista questa rivoluzione tecnologica sembrava la risposta definitiva all'esigenza di sostenibilità ambientale; questa plastica agricola sarebbe stata infatti doppiamente «verde»: sarebbe nata da risorse rinnovabili per poi degradarsi da sé o per effetto dei microrganismi, una volta divenuta rifiuto. Altri tipi di plastica, già prodotti a partire dalle piante, possiedono attrattive simili. Se non che, più di recente, sono stati sollevati dubbi sull'utilità di un approccio del genere. La biodegradabilità, per dirne una, grava essa stessa sull'ambiente con un carico a cui non si pensa: la formazione di biossido di carbonio e metano, proprio due gas-serra le cui emissioni si tenta di ridurre con appositi trattati internazionali. Ma c'è di più: estrarre plastica dalle piante richiede comunque combustibili fossili per soddisfare negli impianti esigenze energetiche che sono assai più grandi di quanto si pensasse. Produrre con successo plastica «verde» sarà possibile se si riuscirà a superare quest'ostacolo in modo economico e senza recare ulteriori danni all'ambiente.

La produzione tradizionale della plastica impiega una quantità sorprendente di combustibili fossili. Autoveicoli, aerei a reazione e centrali elettriche assorbono oltre il 90 per cento dei prodotti delle raffinerie, ma la plastica consuma la gran parte del resto: circa 80 milioni di tonnellate all'anno nei soli Stati Uniti. Gli sforzi per rimpiazzare la plastica convenzionale con alternative d'origine vegetale hanno finora seguito soprattutto tre strade: plastica prodotta per trasformazione esterna di carboidrati vegetali, oppure per conversione all'interno di microrganismi o infine nel mais o in altri tipi di colture.

Tre anni fa la Cargill, gigante dei prodotti agricoli, e la

Dow Chemical, colosso chimico, si coalizzarono per battere la prima delle tre vie, trasformando lo zucchero, ottenuto per elaborazione dell'amido di mais e d'altre piante, in una materia plastica detta polilattìde (PLA). Lo zucchero è fatto fermentare da alcuni microrganismi e diventa acido lattico, che poi in un impianto chimico viene polimerizzato, dando catene macromolecolari con proprietà simili a quelle del PET (polietilentereftalato), prodotto petrolchimico di cui sono fatte le bottiglie d'acqua minerale e alcune fibre tessili.

Alla Cargill venne spontaneo estendere le proprie attività alla ricerca di nuovi derivati dell'amido del mais, nell'ambito dell'industria molitoria che trasforma i chicchi in prodotti vari, tra cui sciroppo ricco di fruttosio, acido citrico, olio di semi, bioetanolo e alimenti per animali. Nel 1999 furono quasi 39 milioni le tonnellate di mais assorbite da questo settore negli Stati Uniti: circa il 15 per cento dell'intero raccolto. Di fatto la Cargill-Dow ha lanciato all'inizio del 2000 un programma da 300 milioni di dollari per avviare entro la fine del 2001 la produzione industriale della sua nuova plastica, la PLA NatureWorks™.

Altre aziende, fra cui l'ICI (Imperial Chemical Industries) hanno sviluppato processi per produrre un secondo tipo di plastica, detta poli-idrossialcanoato (PHA). Come il PLA, il PHA deriva dallo zucchero vegetale ed è biodegradabile. Nel suo caso, tuttavia, il batterio *Ralstonia eutropha* trasforma lo zucchero direttamente in plastica. Per la sua sintesi, il PLA richiede uno stadio fuori dall'organismo vegetale, mentre il PHA s'accumula proprio dentro i batteri in forma di granuli che possono arrivare al 90 per cento della massa cellulare.

In risposta alla crisi petrolifera degli anni settanta, l'ICI sviluppò un processo fermentativo su scala industriale, in cui i microrganismi trasformavano indefessi lo zucchero vegetale in parecchie tonnellate di PHA all'anno. Altre aziende acquistavano questo prodotto e lo stampavano, creando oggetti commerciali biodegradabili - rasoi, bottiglie per shampoo - e li distribuivano in nicchie particolari di mercato; ma i prezzi risultavano superiori a quelli della plastica tradizionale e l'unico vantaggio era la biodegradabilità. Nel 1995 la Monsanto comprò il processo e i brevetti collegati, ma le possibilità di successo commerciale rimasero vaghe.

Da allora molti gruppi universitari e industriali, Monsanto compresa, hanno indirizzato i loro sforzi nel produrre il PHA per una terza via: dentro alla pianta che cresce. Ritoccando il corredo genetico di una coltura in modo da farle sintetizzare la plastica durante la crescita, si eliminerebbe la fase della fermentazione. Niente più coltivazione, trattamento per produrre zucchero, trasformazione fermentativa di quest'ultimo in plastica: ecco la plastica bell'e fatta già nella pianta. Molti ricercatori colsero al volo quella che sembrava la soluzione più efficiente, e più brillante, per produrre plastica da risorse rinnovabili, e si buttarono nella gara per raggiungere l'obiettivo.

Verso il 1985 uno di noi (Slater) faceva parte di un gruppo che isolò i geni grazie ai quali i batteri producevano la plastica. Ne seguì la previsione che, una volta inseriti in una pianta, il suo acetil-coenzima-A - un composto che si forma in natura mentre la pianta sfrutta i raggi solari per i suoi bisogni energetici - si sarebbe trasformato in una materia plastica. Il traguardo fu raggiunto nel 1992 da ricercatori della State University del Michigan in collaborazione con la James Madison University. Sottoponendo la pianta *Arabidopsis thaliana* a ingegneria genetica erano riusciti a farle produrre del PHA, sebbene di tipo fragile. Due anni dopo la Monsanto cominciò un programma per produrre PHA più flessibile all'interno d'una pianta agricola delle più comuni: il mais.

Dal momento che non si poteva sperare che la produzione di plastica per questa via competesse economicamente con la coltivazione a scopi alimentari, l'idea fu di limitare la novità ai fusti e alle foglie, considerati in genere materiale di scarto. I contadini avrebbero potuto raccogliere le pannocchie con la solita trebbiatrice; in un secondo tempo sarebbero state raccolte le stoppie col loro contenuto di plastica. Mentre il PLA e il PHA fatto per fermentazione sottraggono terra alla produzione alimentare, quest'idea avrebbe colto i classici due piccioni con una fava. (Un altro modo per uscire dal dilemma sarebbe ricorrere a piante adatte a terreni poco fertili: erba da fieno, per esempio.)

Energia ed emissioni: problemi irrisolti

La ricerca tecnologica ha fatto grandi passi sia quantitativi (aumento della percentuale di plastica contenuta nella pianta) sia qualitativi (plastica con proprietà migliori e più utili). Visti uno per uno, questi risultati sono incoraggianti; eppure metterli insieme - plastica buona e abbondante al tempo stesso - è tutt'altro che facile. Finora s'è visto che le parti di pianta più adatte a produrre plastica sono i cloroplasti delle foglie. Ma se questi organelli verdi che catturano la luce solare si riempiono di plastica, questa fa ombra e riduce la fotosintesi e la produzione dei chicchi.

Non è uno scherzo neppure estrarre la plastica dalla pianta. Alla Monsanto all'inizio pensavano di inserire questo processo come collaterale ai loro impianti già esistenti per il trattamento del mais. Ma quando passarono a stendere il progetto e calcolarono le quantità di solvente necessario all'estrazione, s'accorsero che erano ben elevate, e dopo l'uso bisognava ricuperarle. L'infrastruttura avrebbe rivaleggiato, come mole, con le fabbriche di plastica convenzionali, superando di gran lunga l'impianto di molitura.

Con il PHA prodotto nel solo fusto del mais, uno stesso raccolto può fornire pannocchie e plastica, ma...

Bene: dateci soldi e tempo e supereremo questi ostacoli, dicemmo. Infatti, avevamo in programma di dedicarci per parecchi anni allo sviluppo di materie plastiche biodegradabili. Ma ne valeva la pena? C'era un aspetto che sollevava forti dubbi: quando calcolammo tutta l'energia e tutte le materie prime necessarie per ogni stadio della produzione di PHA (coltivazione, raccolto, estrazione, purificazione, recupero e riciclo del solvente, miscelazione della plastica per farne un prodotto utile), scoprimmo che sarebbero state consumate più risorse fossili rispetto alla via petrolchimica.

Nel nostro studio più recente, finito nella primavera scorsa, noi e i nostri colleghi abbiamo trovato che produrre un chilogrammo di PHA con mais modificato richiederebbe molta più energia da combustibili fossili che produrne uno di polietilene (PE) dal petrolio. Con nostro disappunto, il beneficio dell'usare mais come base non controbilancerebbe questa richiesta energetica tanto più alta. Secondo i dati di 36 fabbriche europee, forniti dall'Associazione europea dei produttori di materie plastiche, per un chilogrammo di PE ci vogliono 2,2 chilogrammi di petrolio e gas naturale, dei quali però solo 1,2 chilogrammi servono a generare energia: la plastica verde ne richiede di più, e vanno tutti in fumo!

PRODUZIONE E FABBISOGNO ENERGETICO

La plastica di origine vegetale richiede, per la sua produzione, più energia di molte sue controparti d'origine petrolchimica: in altre parole, fa bruciare più combustibili fossili, e quindi provoca una maggiore emissione di gas-serra.

George Retseck

È dunque impossibile pensare che la plastica coltivata nel mais, e poi estratta con energia proveniente da combustibili fossili, possa contribuire a conservare questi ultimi. Quel che si guadagna sostituendo la risorsa esauribile con quella rinnovabile lo si perde nell'energia in più che si consuma. In precedenza uno di noi (Gerngross) aveva scoperto che per produrre un chilogrammo di PHA con la fermentazione microbica ci vogliono 2,39 chilogrammi di combustibile fossile. È anche per questa previsione scoraggiante che la Monsanto, pur essendo all'avanguardia nel settore del PHA d'origine vegetale, ha annunciato alla fine del 1999 che avrebbe chiuso lo sviluppo dei sistemi per la produzione di materie plastiche.

Al momento negli Stati Uniti è in via di commercializzazione una sola plastica d'origine vegetale: il PLA della Cargill-Dow. La sua produzione richiede dal 20 al 50 per cento in meno, in termini di combustibili fossili, rispetto alla plastica derivata dal petrolio; tuttavia i consumi energetici sono significativamente più alti in confronto alla maggior parte dei processi petrolchimici. I portavoce dell'azienda prevedono che si arriverà a ridurli, appellandosi al fatto che si tratta di una tecnologia molto giovane, a fronte dei decenni di esercizio degli impianti petrolchimici. Dateci tempo - dicono - e svilupperemo fonti vegetali alternative, il cui trattamento consumerà meno energia del mais: sfrutteremo il grano o la barbabietola, e così consumeremo meno risorse fossili.

Intanto i tecnici della Cargill-Dow calcolano che il primo impianto per la produzione di PLA, in costruzione a Blair (Nebraska), impiegherà il 50 per cento d'energia in più di quanto serve per il PET, ma il 40 per cento in meno rispetto al nailon, altro concorrente petrolchimico del PLA.

C'è tuttavia un secondo problema ambientale, forse anche più grave, legato alla plastica che viene dalle piante. Per produrre la plastica convenzionale la materia prima è il petrolio, mentre la via vegetale dipende soprattutto dal gas naturale e dal carbone, usati come fonte di energia dall'industria della coltivazione e del trattamento del mais. Ogni metodo basato sulle piante implica perciò il passaggio da una risorsa meno abbondante (petrolio) a una più abbondante (carbone), e alcuni esperti sostengono che si tratta d'un passo verso la sostenibilità. Il baco nel ragionamento è però che il combustibile fossile impiegato per fare plastica partendo da materie prime rinnovabili (mais) deve essere bruciato tutto per generare energia, mentre i processi petrolchimici ne incorporano nel prodotto finale una parte rilevante.

Bruciare più combustibili fossili aggrava un problema ambientale ben noto, il cambiamento del clima globale, aumentando le emissioni di gas-serra, come il biossido di carbonio. Naturalmente è probabile che aumentino anche altre emissioni associate con la produzione d'energia da combustibili fossili: il biossido di zolfo, per esempio. Questo gas contri-

buisce alle piogge acide e quindi deve essere tenuto d'occhio. Per di più ogni processo produttivo che aumenti queste emissioni va in direzione opposta al Protocollo di Kyoto, cioè agli sforzi internazionali per migliorare la qualità dell'aria e frenare il riscaldamento globale, riducendo il biossido di carbonio e altri gas scaricati nell'atmosfera.

Le conclusioni delle nostre analisi sono incontrovertibili. Il beneficio ambientale della plastica coltivata nelle piante è superato da un aumento ingiustificabile dei consumi energetici e delle emissioni gassose. Solo il PLA, fra le materie plastiche derivate dalle piante, sembra avere qualche possibilità di diventare competitivo per questi aspetti. Non rappresenta una soluzione elegante come il PHA prodotto dentro le piante, però sfrutta fattori di rilievo che contribuiscono all'efficienza del processo: basso fabbisogno energetico e alte rese di conversione (la massa del polimero finale corrisponde a quasi l'80 per cento di quella degli zuccheri di partenza). Questa plastica ha tanti vantaggi ambientali rispetto alle altre plastiche vegetali, ma la sua produzione emetterà inevitabilmente più gas-serra di molte controparti petrolchimiche.

La risposta? Energia rinnovabile

Nello spirito della nostra analisi iniziale, intesa a riportare ragionevolezza nella discussione, non ce la siamo però sentita di affermare che le tecnologie basate sulle piante sono da condannare senza appello. Abbiamo invece immaginato che il maggior fabbisogno energetico potesse essere coperto dalla combustione di materiale vegetale (biomassa). Si producono emissioni anche in questo caso, ma più innocenti di quelle derivanti dal carbonio delle risorse fossili, che è intrappolato nel sottosuolo da milioni d'anni. Quando brucia il carbonio contenuto nei fusti del mais o in altre piante, non cresce il bilancio netto del biossido di carbonio nell'atmosfera, poiché, almeno in teoria, una quantità uguale di gas verrà assorbita da nuove piante che cresceranno la primavera successiva. (Per lo stesso motivo la plastica d'origine vegetale non aumenta il livello di biossido di carbonio, quando viene incenerita dopo l'uso.)

Ecco il ragionamento: il ricorso a biomassa rinnovabile, come fonte primaria d'energia nell'industria del trattamento del mais, sarebbe capace di rompere il legame fra produzione di

I PREGI DELLA PLASTICA VERDE

Intervista a Patrick Gruber, vice presidente della Divisione tecnologia della Cargill-Dow, sulla plastica prodotta dalla sua azienda a partire dalle piante.

Come farà il PLA NatureWorks™ a competere con la plastica di origine petrolchimica?

Il PLA NatureWorks™ combina parecchie proprietà in una sola famiglia di materie plastiche. Per esempio, la sua lucentezza e la sua capacità di mantenere torsioni e pieghe meglio delle sue controparti petrolchimiche sono un richiamo per le aziende che stanno sviluppando il PLA come materiale per fare cartine da caramelle e altri tipi di confezioni per il consumo. Inoltre il PLA offre ai produttori di tessuti una fibra naturale in grado di competere con quelle sintetiche, come il nailon, sia nelle prestazioni sia nella facilità di processo. Globalmente l'industria valuta in parecchi milioni di dollari il mercato potenziale del PLA in settori quali l'abbigliamento in genere e quello per il fitness, i prodotti per l'igiene, le fibre per tappeti e l'imballaggio.

Che vantaggi ambientali offre il PLA?

Dal momento che utilizziamo zucchero ricavato dalle piante invece di combustibile fossile, la sua produzione consuma dal 20 al 50 per cento in meno di risorse fossili della plastica convenzionale. Inoltre il PLA può essere degradato fino ai suoi componenti originari in vista del riciclo chimico, oppure può essere riciclato meccanicamente. Un nostro cliente sta già pensando a quest'ultima possibilità nel settore dei tappeti. Il PLA è anche biodegradabile, più o meno come la carta, nelle strutture municipali che trasformano i rifiuti in compost. Insomma ci renderà meno dipendenti dai combustibili fossili, e nello stesso tempo s'inserirà perfettamente nei metodi correnti di smaltimento dei rifiuti. Sono vantaggi ambientali evidenti, ma insieme credo che la gente comprerà gli oggetti di PLA per le loro prestazioni, per nulla inferiori a quelle ottenute con le tecnologie tradizionali.

Basteranno questi vantaggi a controbilanciare e superare l'handicap dell'energia impiegata, maggiore di quella che serve per produrre certe plastiche petrolchimiche?

È importante rendersi conto che la nostra nuova tecnologia ha solo dieci anni, e dunque bisogna aspettarsi che maturi notevolmente nell'avvenire: non dimentichiamo che la petrolchimica ha avuto quasi un secolo per svilupparsi. Eppure già il nostro primo impianto produttivo, che stiamo costruendo nel Nebraska, userà solo il 40 per cento dell'energia, prodotta da combustibili fossili, che occorre per fare il nailon. Nei nostri prossimi due stabilimenti, in programma già per il 2004, quando i nostri scienziati e i nostri tecnici avranno trovato le condizioni d'esercizio migliori, ci aspettiamo un fabbisogno energetico dimezzato.

Avete in programma d'affrontare quello che Gerngross e Slater chiamano «il difetto ambientale del PLA»?

Sì. Non ci limitiamo a sviluppare metodi di produzione che richiedano meno energia, ma studiamo addirittura modi più efficienti di produrla: cogenerazione, combustibili rinnovabili (come le piante o la biomassa). Stiamo anche pensando a materie prime diverse per il PLA. Già l'idea di ricorrere a zuccheri fermentabili derivati dai fusti e dalle foglie di mais permette allo stesso terreno di dare due raccolti per volta: il PLA e le pannocchie. Inoltre il PLA può anche derivare dal frumento, dalle barbabietole e da altre colture, secondo il clima della zona agricola.

Le cartine di caramella sono solo uno dei prodotti in cui le aziende pensano d'impiegare la nuova plastica vegetale della Cargill-Dow, non appena arriverà sul mercato (fine del 2001).

MA QUELLA ITALIANA È «VERDE» DAVVERO

«Solo un quinto!» ci dice, parlando del consumo di combustibili fossili, Luigi Marini, direttore commerciale della Novamont, l'azienda italiana che produce dall'amido le plastiche Mater-Bi.

Si riferisce a un prodotto particolare, ingegner Marini? «Negli Stati Uniti la National Starch sta producendo su nostra licenza, partendo dall'amido, trucioli espansi da imballaggio: rispetto al polistirene, fanno risparmiare una dose altissima di petrolio. Ho detto che il consumo è un quinto, ma solo per prudenza: non mi stupirei se, fatta un'analisi molto precisa sul ciclo di vita, risultasse ancor meno.»

Nati dalle ricerche cominciate nel 1989 da Catia Bastioli, attuale direttore generale della Novamont, i Mater-Bi si distinguono dai materiali discussi nell'articolo di Gerngross e Slater, perché l'amido ha subito solo un trattamento con acqua a caldo e sotto pressione, che l'ha reso termoplastico. Secondo le applicazioni, vengono aggiunti plastificanti d'origine vegetale anch'essi, e polimeri petrolchimici; dalle piante proviene comunque almeno il 50 per cento d'ogni Mater-Bi, con punte del 100 per cento in alcuni materiali espansi.

Fra i settori nei quali i prodotti della Novamont si sono già affermati, degno di nota è quello dei sacchi biodegradabili per la raccolta differenziata dei rifiuti da avviare al compostaggio: «Li usano già 800 Comuni in Italia e oltre 1000 in Europa» informa Marini, snocciolando numeri che indicano una crescita assai rapida.

GIANNI FOCHI

plastica e risorse fossili; tuttavia questo cambiamento imporrebbe di scavalcare certe barriere tecnologiche durature e di approntare un'infrastruttura interamente nuova nel settore della produzione d'energia. Allora ci siamo chiesti: «Ci si arriverà mai?». Di fatto la tendenza nella produzione di energia negli Stati americani in cui si coltiva il mais è opposta. Nel 1998 gran parte di questi Stati traeva dal carbone una frazione sproporzionata della propria energia elettrica - per esempio, l'86 per cento l'Iowa, l'Indiana addirittura il 98 per cento - in confronto col 56 per cento circa della media nazionale.

Sia la Monsanto sia la Cargill-Dow sono da tempo alla ricerca di strategie per ricavare energia dalla biomassa. In un'analisi teorica la Monsanto ha immaginato di bruciare tutti i fusti e le foglie di mais, dopo averne estratto la plastica, per generare elettricità e vapore. In questo scenario l'elettricità da biomassa è risultata più che sufficiente ad alimentare l'estrazione del PHA. L'energia in eccesso potrebbe essere trasportata fuori dall'impianto, sino alla centrale elettrica, in modo da ottenere nello stesso tempo un consumo minore di combustibile fossile e una materia plastica utile.

Ebbene: è stato proprio il passaggio a una fonte energetica vegetale - e non l'uso di piante come materia prima - che ha portato il maggior beneficio ambientale. Quando abbiamo pensato a separare la produzione di plastica da quella di energia, abbiamo visto la razionalità del ricorso, per molti processi industriali, all'energia rinnovabile piuttosto che a quella fossile, indipendentemente dalla via seguita per produrre la plastica. In altre parole: perché preoccuparci di cercare un processo alternativo, che finisce col consumare più energia, quando possiamo continuare a produrre plastica nel modo convenzionale, ma consumando molta energia in meno, e quindi emettendo meno gas-serra? È evidente che verrebbero abbattuti sia le emissioni sia il depauperamento delle risorse fossili, se continuassimo a usare il petrolio solo come materia prima nella sintesi della plastica e non per produrre energia, che potrebbe invece provenire dalla biomassa.

Purtroppo non esiste una strategia che da sola riesca a superare tutti i limiti ambientali, tecnici ed economici dei vari processi di produzione. Le materie plastiche convenzionali, a differenza del PLA e del PHA, richiedono i combustibili fossili come materia prima. Hanno anche una gamma più vasta di proprietà, ma non sono biodegradabili. La biodegradabilità allevia il problema dello smaltimento dei rifiuti solidi; degradandosi, però, i polimeri emettono gas-serra, cioè compromettono la qualità dell'aria. Dal punto di vista tecnologico, il PLA vegetale e il PHA da fermentazione sono più semplici da produrre del PHA prodotto direttamente dentro le piante di mais, ma occupano terreno che potrebbe servire ad altri scopi.

Noi proponiamo che qualunque schema adottato per produrre plastica non debba limitarsi a diminuire l'emissione di gas-serra, ma fare un passo avanti: invertire il flusso del carbonio nell'atmosfera. Il raggiungimento di questa meta richiederà di trovare il modo di produrre plastica non degradabile a partire da risorse che assorbano il biossido di carbonio dall'aria: appunto le piante. Anche alcune materie plastiche biodegradabili potranno tuttavia avere l'effetto benefico di sottrarre carbonio, perché finiranno in discariche le cui condizioni non permettono una degradazione rapida.

In fin dei conti, sarebbe troppo porre all'industria della plastica l'obiettivo di ridurre il livello atmosferico del biossido di carbonio. Ogni processo produttivo dovrebbe trarre beneficio dall'uso di materie prime ed energia entrambe rinnovabili. Di fronte ai vantaggi, potrebbe valere la pena d'affrontare grossi cambiamenti nelle strutture mondiali per la produzione d'energia elettrica.

TILLMAN U. GERNGROSS e STEVEN C. SLATER hanno lavorato per più di otto anni nell'industria e nell'università allo sviluppo di tecnologie per la produzione di plastica biodegradabile. Entrambi hanno contribuito alla comprensione dell'enzimologia e della genetica dei batteri produttori di plastica. Negli ultimi due anni hanno spostato il loro interesse all'influenza della produzione di plastica sull'ambiente. Gerngross è assistente al Dartmouth College, Slater è ricercatore anziano alla Cereon Genomics (un'azienda del gruppo Monsanto) di Cambridge, Massachusetts.

POIRIER Y., DENNIS D. E., KLOMPARINS K. e SOMERVILLE C., *Polyhydroxybutyrate, a Biodegradable Thermoplastic, Produced in Transgenic Plants* in «Science», 256, aprile 1992.

GERNGROSS TILLMAN U., *Can Biotechnology Move Us toward a Sustainable Society?* in «Nature Biotechnology», 17, giugno 1999.

Energy Information Administration, US Department of Energy (www.eia.doe.gov).

Association of Plastics Manufacturers in Europe (www.apme.org).

È nata una stella

Gli enigmi della genesi stellare

Per dare origine a una stella, gas e polvere devono concentrarsi in una piccola regione. E allora perché gli astronomi vedono flussi di materia diretti verso l'esterno?

di Thomas P. Ray

In una notte d'inverno nell'emisfero settentrionale, verso mezzanotte, provate a guardare il cielo direttamente verso sud: vedrete la costellazione di Orione, forse il gruppo di stelle più noto dopo l'Orsa maggiore. Appena sotto la Cintura di Orione, che è chiaramente indicata da tre stelle brillanti poste in fila, vi è la Spada di Orione, e nel centro di quest'ultima si nota una debole chiazza non ben definita. È la Nebulosa di Orione, un gigantesco «nido d'infanzia» stellare, che contiene migliaia di stelle appena nate.

Questa nebulosa è un sito quasi perfetto per studiare la nascita delle stelle perché è relativamente vicina - è a soli 1500 anni luce - e contiene stelle di grande e di piccola massa in quantità equilibrata. Include anche notevoli quantità di gas e polvere, aggregati nelle cosiddette nubi molecolari. È noto che simili nubi costituiscono la materia prima per la formazione di nuove stelle. Ciò che sta accadendo in Orione probabilmente ripete quello che avvenne nella nostra regione di galassia cinque miliardi di anni fa, quando furono generati il Sole e i suoi pianeti.

Comprendere come si formino stelle e pianeti è uno dei temi fondamentali dell'astronomia; eppure, fino a tempi recenti, era anche uno dei più enigmatici. Vent'anni fa, gli astronomi sapevano di più sui primi tre minuti dell'universo che non sui primi tre miliardi di giorni del sistema solare. Solo nello scorso decennio si sono cominciate ad avere risposte a molte domande. Si è visto che le stelle neonate sembrano versioni in miniatura del centro di un quasar, con grandi getti di materia espulsi verso l'esterno da potenti campi magnetici. Queste «fontane della giovinezza» stellari non solo appaiono splendide nelle fotografie, ma aiutano anche a risolvere paradossi che hanno tormentato a lungo gli astronomi.

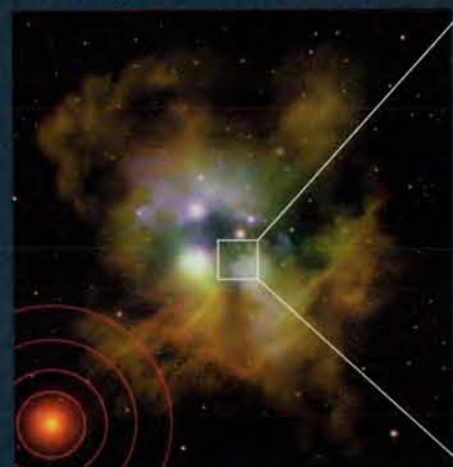
Una regione di formazione stellare nella Nebulosa di Orione (*pagina a fronte*) dove vi sono centinaia di nuove stelle. La circonda una nube molecolare invisibile ma immensa: un milione di masse solari di gas e polvere in un volume del diametro di 300 anni luce. Le giovani stelle di Orione sono avvolte da dischi di materia grandi all'incirca quanto il sistema solare (*sopra*); intorno ad alcune di esse, potrebbero esservi pianeti in formazione.

C. Robert O'Dell, Mark McCaughrean e John Bally *Hubble Space Telescope* e NASA (*dischi*); Gary Bernstein e Megan C. Novicki *University of Michigan* e Lucent Technologies (*nebulosa*)

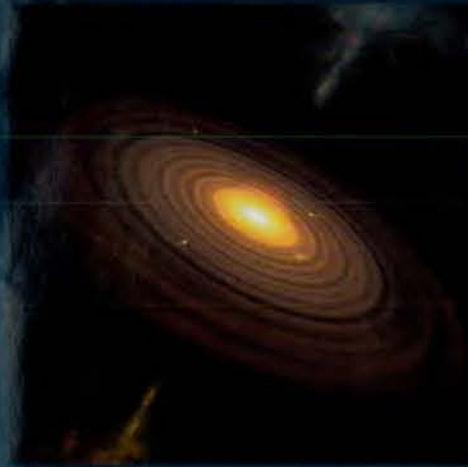
Sbirciare oltre il velo

La teoria della formazione di stelle e pianeti ha una storia venerabile. Poco più di 200 anni fa, il matematico francese Pierre-Simon de Laplace avanzò l'ipotesi che il sistema solare si sia generato a partire da una nube di gas in rotazione. Egli propose che la gravità facesse migrare gran parte del gas verso il centro, dando così origine al Sole. Allo stesso tempo, una parte della materia, a causa della rotazione, non poté essere assorbita nel giovane Sole e si concentrò invece in un disco, dal quale successivamente si generarono i pianeti. Secondo le moderne simulazioni, una volta che la nube in rotazione comincia a collassare, si ha rapidamente la formazione di una o più stelle, di un disco protoplanetario e di una nube residua di gas (atomi e molecole singoli) e di polvere (aggregati di atomi e molecole).

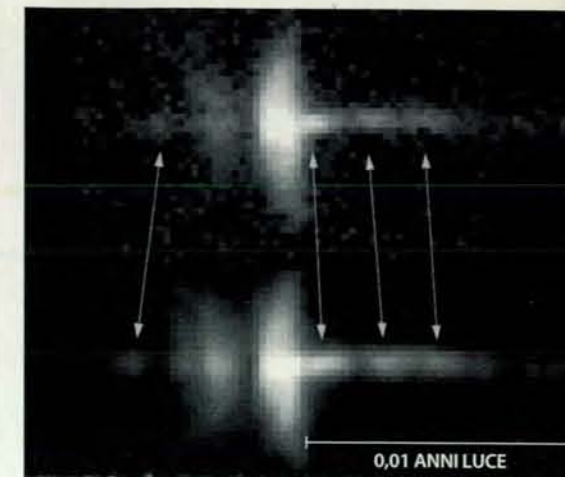
Il modello di Laplace non fu universalmente accettato. Teorie rivali, come quella secondo cui i pianeti sarebbero costituiti da materia strappata al Sole da una stella di passaggio, venivano prese in considerazione fino a non molti decenni fa. Le incertezze erano soprattutto osservative: verificare il modello era al di là delle possibilità della ricerca astronomica di una trentina d'anni fa, per due motivi. In primo luogo, la nube residua di gas e polvere blocca la vista proprio della regione che deve essere studiata. Inoltre, i di-

Dalla polvere alla stella

Una stella comincia ad aggregarsi quando una perturbazione, come una vicina esplosione di supernova, fa sì che una nube di gas e polvere collassi.

Il gas e la polvere si raccolgono nel centro, circondati da un involucro di materia e da un disco in rotazione. Forze magnetiche dirigono getti in direzione assiale.

La materia continua a piovere sul disco. Circa un decimo di essa fluisce verso l'esterno in una corrente irregolare, spingendo via il gas circostante.

La materia del disco si aggrega in planetesimi. L'involucro e i getti si dissipano. A questo punto, è passato un milione di anni.

La temperatura e la pressione elevate nel centro della stella innescano la fusione nucleare. I planetesimi si sono assemblati in pianeti.

Alfred T. Kamajian

Queste immagini di una stella appena nata, Herbig-Haro 30, ottenute a un anno di distanza, mostrano «tasche» di gas che si allontanano dal centro. Questi getti sono chiaramente perpendicolari al disco oscuro che nasconde la stella.

Christopher J. Burrows Space Telescope Science Institute e NASA

schi protoplanetari sottendono angoli di cielo minuscoli: se la distanza fra il Sole e Plutone (6 miliardi di chilometri) è rappresentativa della scala dei dischi, i telescopi convenzionali con base a terra possono risolverli fino alla distanza di 200 anni luce circa. E telescopi più grandi non servono: la perdita di dettaglio avviene a causa dell'atmosfera.

Anche taluni problemi teorici eludevano gli astronomi. Alla giovane età di 100 000 anni, le stelle di tipo solare compiono una rotazione nell'arco di alcuni giorni, e sono quattro o cinque volte più grandi del Sole adulto. Contraendosi, queste stelle dovrebbero ruotare più velocemente, proprio come un pattinatore che avvicini le braccia al corpo. Eppure il Sole ha evidentemente rallentato, dato che oggi impiega circa un mese per compiere una rotazione. Qualcosa, quindi, deve avergli sottratto momento angolare. Ma che cosa?

Un altro problema è in che modo le nubi molecolari riescano a sopravvivere tanto a lungo. La gravità tende a farle collassare, e in assenza di altri fattori dovrebbero contrarsi nel giro di un milione di anni. Tuttavia, sembra che le nubi possano perdurare per alcune decine di milioni di anni. Che cosa le mantiene integre? La pressione termica è assolutamente inadeguata, perché le nubi sono di gran lunga troppo fredde, avendo una temperatura di soli 10-20 kelvin. La turbolenza potrebbe funzionare, ma da che cosa può essere generata? Nelle nubi molecolari giganti come quella della Nebulosa di Orione, il vento stellare e le onde d'urto prodotti dalle stelle di grande massa avviluppate dalla nube potrebbero dar luogo a un adeguato rimescolamento, ma molte nubi più piccole e tranquille non contengono stelle massicce.

Il primo ostacolo cadde alla fine degli anni settanta, quando gli astronomi iniziarono a scrutare le regioni di formazione stellare a lunghezze d'onda capaci di penetrare la coltre di nubi. Sebbene i grani di polvere assorbano la radiazione visibile, hanno scarso effetto sulle lunghezze d'onda molto più grandi del loro diametro (circa un micrometro). Studiando regioni come la nube molecolare in Orione alle lunghezze d'onda millimetriche - una parte dello spettro mai esplorata prima, fra il dominio infrarosso e quello radio - gli astronomi hanno identificato aggregati densi e freddi, tipicamente con un diametro di circa un anno luce. Simili oggetti, battezzati nuclei molecolari, contenevano alcune masse solari di gas e ben presto furono identificati con le nubi in rotazione di Laplace.

Come spesso accade, emersero subito nuovi enigmi. Sebbene alcuni nuclei molecolari sembrino essere in fase di collasso, la maggior parte di essi appare stabilizzata da processi che non sono interamente compresi. Quali fattori, a un certo punto, diano inizio al loro collasso è ugualmente incerto, ma è possibile che sia necessaria una spinta dall'esterno: per esempio, un'esplosione di supernova vicina. Il problema più arduo riguarda la direzione in cui la materia si sta muovendo. Secondo l'ipotesi di Laplace, le stelle si formano per accrescimento gravitazionale, sicché gli astronomi si aspettavano di vedere indizi della caduta di gas sui nuclei.

Con stupore, scoprirono invece che il gas, in forma di molecole (anziché di atomi o di ioni) sta muovendosi verso l'esterno. Di solito si potevano notare due lobi giganteschi di gas molecolare, ai lati della giovane stella. Questi lobi, della lunghezza di alcuni anni luce, hanno masse simili, o anche superiori, a quella della stella vera e propria, e si allontanano da essa alla velocità di decine di chilometri al secondo.

Getti dalla culla

Questi lobi molecolari somigliano ai lobi, ben più grandi, di plasma caldo che si osservano presso le galassie attive, come i quasar. Da anni si sa che i lobi galattici sono prodotti da getti che sfrecciano verso l'esterno a velocità vicine a quella della luce e possono estendersi per milioni di anni luce. È possibile che una versione in miniatura di questi getti alimenti anche i lobi molecolari nelle regioni di formazione stellare?

L'idea risale a una scoperta compiuta all'inizio degli anni cinquanta da George H. Herbig e Guillermo Haro. Herbig, che lavorava al Lick Observatory nella California settentrionale, e Haro, dell'Osservatorio Tonantzintla in Messico, avevano indipendentemente scoperto alcune deboli chiazze nebulose in Orione. Oggi chiamate oggetti Herbig-Haro, queste nubi furono dapprima ritenute siti di formazione stellare. (Alcuni libri divulgativi riportano ancora oggi questa teoria erronea.) Nel 1975, tuttavia, Richard D. Schwartz, allora all'Università della California a Santa Cruz, si accorse che lo spettro di un oggetto Herbig-Haro somiglia notevolmente a quello della materia residua di un'esplosione di supernova. Dallo spostamento Doppler delle righe spettrali, trovò che gli oggetti Herbig-Haro sono in moto a velocità anche di alcune centinaia di chilometri al secondo.

È un moto più lento di quello di un resto di supernova, ma Schwartz dedusse che i princìpi siano gli stessi; in particolare, che gli oggetti Herbig-Haro siano flussi di gas riscaldato espulsi da una stella. Il calore, come nei resti di supernova, proviene dal moto stesso del gas; le onde d'urto convertono parte dell'energia cinetica in energia termica e poi in radiazione. L'idea di Schwartz ottenne conferma dal confronto fra immagini di oggetti Herbig-Haro riprese a distanza di alcuni anni, dalle quali era evidente che gli oggetti stessi erano in moto. Estrapolando all'indietro nel tempo, gli astronomi riuscirono a determinare la sorgente degli oggetti Herbig-Haro, che risultò essere sempre una stella giovane, dell'età di alcune centinaia di migliaia di anni.

La verifica di questa connessione fu resa possibile da un'altra rivoluzione tecnologica: l'introduzione dei CCD (*charge-coupled device*), i chip fotosensibili presenti anche nei videoregistratori e nelle macchine fotografiche digitali. I CCD offrono un contrasto e una sensibilità maggiori rispetto alle lastre fotografiche. Nel 1983 Reinhard Mundt e Josef Fried del Max-Planck-Institut für Astronomie di Heidelberg, in Germania, eseguirono le prime osservazioni di getti stellari con i CCD. Ricerche successive a opera di Mundt, di Bo Reipurth dell'European Southern Observatory a Santiago del Cile e di altri (me incluso) dimostrarono che i getti delle stelle giovani si estendono per vari anni luce e sono strettamente correlati agli oggetti Herbig-Haro. Anzi, alcuni di questi si rivelarono essere la regione più luminosa di un getto. Altri risultarono onde d'urto prodotte dai getti che attraversano il gas circostante a velocità supersonica. In genere i getti hanno una temperatura di circa 10 000 kelvin e contengono 100 atomi per centimetro cubo: sono quindi più densi dell'ambiente circostante, ma 10 000 volte più rarefatti del vuoto migliore che si possa ottenere in laboratorio. Presso la stella il getto è sottile, con un angolo di apertura di pochi gradi, ma via via che si allontana tende ad allargarsi, fino a raggiungere un diametro maggiore dell'orbita di Plutone.

Togliersi di mezzo

In che modo i getti e gli oggetti Herbig-Haro, che sono costituiti in gran parte da atomi e ioni, si collegano ai flussi molecolari? Quando si scoprirono questi ultimi, alcuni ricercatori proposero che potessero consistere di gas che era stato accelerato nei pressi della stella giovane. Ma l'ipotesi era problematica. I flussi molecolari, anche quelli associati a stelle di piccola massa, spesso contengono parecchie masse solari di gas. Se questa quantità di materia dovesse essere risucchiata gravitazionalmente dalla stella prima di venire accelerata di nuovo verso l'esterno, la formazione stellare sarebbe un processo inefficiente. Una spiegazione migliore è che un lobo molecolare consista di gas circostante la stella accelerato per interazione con il getto.

Nessuna di queste osservazioni, però, arrivava al nocciolo della questione: il disco intorno alla stella in formazione. Da tempo si vanno raccogliendo indicazioni sull'esistenza dei dischi di accrescimento. All'inizio degli anni ottanta l'Infrared Astronomical Satellite scoprì che molte stelle giovanissime mostravano un eccesso di radiazione infrarossa rispetto a quella che dovrebbe essere prodotta dalla stella in sé. La fonte più probabile sembrava essere la polvere calda di un disco. Nello stesso periodo, mediante telescopi per onde millimetriche, si cominciò a misurare la massa di gas e polvere intorno a queste stelle, ricavando tipicamente valori di 0,01-0,1 masse solari: esattamente la quantità di materia che occorrerebbe per formare un sistema planetario. A metà degli anni ottanta Edward B. Churchwell dell'Università del Wisconsin e colleghi, osservando la Nebulosa di Orione alle lunghezze d'onda radio, trovarono sorgenti confrontabili per dimensioni al sistema solare, che interpretarono come nubi di gas caldo evaporate da un disco.

Per individuare i dischi, però, bisognava superare il secondo ostacolo: le loro dimensioni relativamente ridotte. Gli astronomi dovettero attendere la nitidezza delle immagini dello Hubble Space Telescope e dei telescopi a terra equipaggiati con ottiche adattative. Nel 1993 C. Robert O'Dell della Rice University e collaboratori osservarono Orione con lo Hubble e finalmente videro i dischi ipotizzati da Laplace. La materia che li compone, nelle zone in cui è squassata dall'intensa radiazione e dai venti emessi dalle vicine stelle

di grande massa, tende a evaporare. O'Dell, contraendo in maniera bizzarra il termine «dischi protoplanetari», diede loro il nome di «proplidi». In realtà potrebbe essere una denominazione erronea, perché questi dischi evaporerанno entro un milione di anni, probabilmente prima che si possano formare pianeti. Ma dischi simili in ambienti meno estremi dovrebbero sopravvivere abbastanza per dare vita a pianeti.

Avendo scoperto tutte le componenti basilari della versione moderna della teoria di Laplace - nubi in rotazione, flussi di materia diretti verso l'esterno, dischi - ci si poteva dedicare allo studio delle loro relazioni. I miei colleghi e io, con il gruppo guidato da Christopher J. Burrows dello Space Telescope Science Institute, abbiamo puntato Hubble su Herbig-Haro 30, un oggetto costituito da una coppia di getti in direzioni opposte. Con sorpresa, le immagini rivelarono due piccole nebulose a cuspide dove dovrebbe trovarsi la sorgente dei getti. Una fascia scura attraversa le due nebulose. Ben presto divenne chiaro che stavamo osservando un disco perpendicolare ai getti, il quale, visto di taglio dal nostro punto di osservazione, copre la stella centrale. Le nebulose sono nubi di polvere illuminate dalla luce stellare; verso l'esterno puntano i due getti, culminanti nell'oggetto Herbig-Haro. Sembrava dunque che il rompicapo della formazione stellare fosse sul punto di essere risolto.

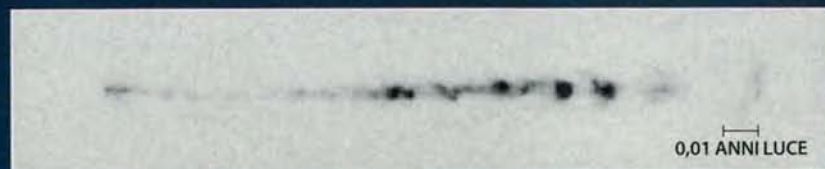
Nelle galassie attive, i dischi sono indispensabili per la formazione dei getti. Ma come funziona il processo nel caso di una stella in embrione? Una coincidenza si è rivelata un indizio interessante. Tutti i getti e i flussi localizzati presso Herbig-Haro 30, con una strana eccezione, hanno la medesima orientazione: sono allineati con il campo magnetico della nube progenitrice. Ciò pare confermare alcune ingegnose supposizioni di Ralph E. Pudritz e Colin A. Norman, allora entrambi all'Università di Cambridge, e di Frank H. Shu dell'Università della California a Berkeley, su come i campi magnetici potrebbero alimentare l'emissione di materia da una stella giovane.

Si conoscono molti esempi di campi magnetici che incanalano il gas ionizzato. Per esempio, le aurore terrestri sono causate da particelle cariche che discendono lungo le linee di forza del campo magnetico e colpiscono l'alta atmosfera. Allo stesso modo, le particelle ionizzate di un disco circumstellare potrebbero associarsi alle linee di forza del disco o della stella. Dato che il disco ruota, le particelle verrebbero sottoposte a una forza centrifuga e sarebbero proiettate verso l'esterno lungo le linee di forza. Altra materia fluirebbe a sostituire quella perduta e il processo continuerebbe. Anche se gran parte della materia finirebbe per depositarsi sulla stella, circa il 10 per cento potrebbe essere espulso. In simulazioni al calcolatore il processo si svolge a intermittenza, il che spiegherebbe la struttura «a grumi» di molti getti.

Che cosa fanno i getti

Per quanto i meccanismi di dettaglio possano essere misteriosi, i getti comportano sempre lo stesso processo di base: un bilanciamento fra gravità e momento angolare. La gravità tende ad attrarre la materia verso il centro di massa ma, a causa delle forze centrifughe, non riesce a fare di più che raccoglierla in un disco rotante. Sottili fasci di gas fuoriescono lungo l'asse di rotazione, che è la direzione nella quale per la materia è più facile propagarsi. La materia che sfugge porta con sé momento angolare, riducendo anche la quantità di materia libera che può ricadere all'interno.

William B. Sparks *Space Telescope Science Institute*

Si ritiene che il nucleo della galassia attiva Messier 87 sia alimentato da un buco nero di un miliardo di masse solari.

Thomas P. Ray

Su scala molto più piccola, una stella appena nata raccoglie ed espelle una corrente di gas: è l'oggetto peculiare chiamato Herbig-Haro 34. Il getto può spingere verso l'esterno il gas molecolare circostante.

Michel Fich *University of Waterloo* e Gerald Moriarty-Schieven *Joint Astronomy Center, Hawaii*

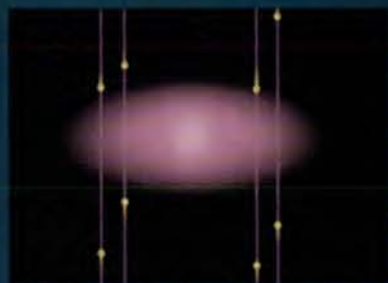
Osservando la regione di formazione stellare NGC 2264 a lunghezze d'onda millimetriche, si notano due lobi di gas molecolare in moto a una velocità di decine di chilometri al secondo. Il rosso indica le velocità più elevate, il viola le più basse.

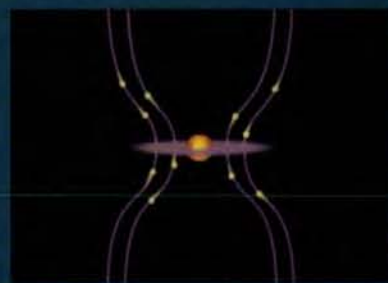
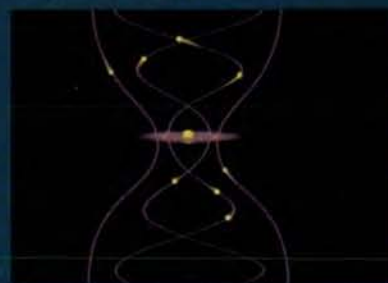
Jon A. Morse *Space Telescope Science Institute* e NASA

Complessi andamenti a getto, evidenti in Herbig-Haro 47, possono insorgere per variazioni nella velocità di emissione e negli effetti gravitazionali di stelle compagne.

Non più nebulose

L'aver stabilito che i getti sono una parte integrante del processo di formazione stellare potrebbe risolvere molti problemi teorici. Propagandosi verso l'esterno, le particelle sottraggono alla sorgente momento angolare, il che potrebbe in parte spiegare perché le stelle mature come il Sole ruotino lentamen-

Un campo magnetico inquieto

La produzione di getti può avere inizio quando una miscela di ioni, atomi, molecole e grani di polvere cade sul disco circumstellare lungo le linee di forza magnetiche.

Via via che il disco si contrae per azione della gravità, le linee di forza (che sono «congelate» nella materia) sono attratte verso il centro, formando una sorta di clessidra.

Quando le linee di forza sono inclinate di 30 gradi dalla perpendicolare, la forza centrifuga vince la gravità e scaglia via la materia lungo le linee stesse.

L'inerzia della materia in rotazione contorce le linee di forza in un'elica, che aiuta a incanalare il flusso diretto verso l'esterno in direzione verticale.

Alfred T. Kamajian

te. I getti, poi, potrebbero rimescolare la nube circostante, fornendo la turbolenza utile a ritardarne il collasso.

Ma molte domande restano aperte. Per esempio, sono stati rilevati dischi solo attorno al 50 per cento circa delle stelle giovani visibili nell'ottico; forse anche le altre li possedevano ed è possibile che essi si siano già aggregati in pianeti, ma dalle osservazioni non se ne è avuta conferma. Un altro problema è la distribuzione delle masse. Perché il rapporto fra stelle di grande e di piccola massa è più o meno costante in ogni punto della Galassia? Questo rapporto sembra essere una proprietà fondamentale del modo in cui le nubi molecolari vanno incontro a frammentazione, ma non è chiaro il perché. Un problema correlato è che si sa poco sulle prime fasi di vita delle stelle di grande massa: sia perché sono abbastanza rare, sia perché si evolvono più velocemente e sono difficili da cogliere nel momento della formazione.

Con queste precisazioni, è possibile delineare la «ricetta» che la natura segue per produrre le stelle. Esse si formano in nubi interstellari costituite in gran parte dalle ceneri di precedenti generazioni stellari. La polvere è stata generata nel vento e nell'atmosfera esterna, relativamente freddi, di stelle vicine al termine dell'esistenza. Le nubi contengono anche elementi pesanti come ferro e ossigeno, sintetizzati nei «forni nucleari» al centro di stelle ormai defunte. Campi magnetici o moti turbolenti stabilizzano per un certo tempo le nubi, ma prima o poi queste collassano per effetto del proprio peso, forse a causa dell'esaurimento del campo magnetico, della dispersione della turbolenza o dell'esplosione di una supernova vicina. Via via che la materia ricade verso il centro, le nubi si frammentano e ciascuna delle parti così formate diventa un sistema stellare primitivo. Nei nuclei molecolari di grande massa, come quelli che hanno originato l'ammasso nella Nebulosa di Orione, questi sistemi sono distanziati di alcune settimane luce (anziché anni luce, come avviene di solito). La maggior parte delle stelle della Galassia, compreso il Sole, probabilmente si è formata in un ammasso di questo genere.

I getti sottraggono momento angolare al sistema e permettono al processo di accrescimento di continuare. Un tempo il Sole doveva avere getti sottili lunghi diversi anni luce, e non è chiaro che cosa li abbia estinti. Forse la riserva di materia in caduta si è semplicemente esaurita. Una parte potrebbe essere stata allontanata dai flussi diretti verso l'esterno; in tal caso, i getti potrebbero aver avuto la funzione di limitare la massa finale del Sole. Circa allo stesso tempo, grani di polvere di grandi dimensioni cominciarono a unirsi e a formare i planetesimi, i «mattoni» per la costruzione dei pianeti. A loro volta i planetesimi raccolsero il gas rimanente, riducendo ulteriormente l'alimentazione dei getti. I flussi di materia emessi dal Sole e dalle stelle della sua generazione soffiarono via il gas e la polvere rimanenti dallo spazio circostante. Questo processo indebolì il legame gravitazionale che manteneva vicine le stelle, e in pochi milioni di anni esse si dispersero. Oggi la stella più vicina al Sole dista circa quattro anni luce.

A due secoli dalla formulazione dell'ipotesi di Laplace, i pezzi del *puzzle* iniziano ad andare a posto. Lo studio delle stelle giovani indica non solo che la formazione dei pianeti è un processo ancora in corso, ma anche che i corpi planetari devono essere molto comuni nella nostra e in altre galassie.

THOMAS P. RAY insegna al Dublin Institute for Advanced Studies; ha lavorato all'Università del Sussex e al Max-Planck-Institut für Astronomie di Heidelberg, studiando le riprese di getti da stelle giovani fatte con lo Hubble Space Telescope.

COHEN MARTIN, *In Darkness Born: The Story of Star Formation*, Cambridge University Press, 1987.

O'DELL C. ROBERT e BECKWITH STEVEN V. W., *Young Stars and their Surroundings* in «Science», 276, n. 5317, 30 maggio 1997.

RAY THOMAS P., *Jets: A Star Formation Perspective* in *Astrophysical Jets, Open Problems*, a cura di Silvano Massaglia e Gianluigi Bodo, Gordon and Breach Scientific Publishers, 1998.

LADA CHARLES J. e KYLAFIS NIKOLAOS D. (a cura), *The Origin of Stars and Planetary Systems*, Kluwer Academic Publishers, 1999.

MANNINGS VINCE, BOSS ALAN P. e RUSSELL SARA S. (a cura), *Protostars and Planets IV*, University of Arizona Press, 2000.

JAYAWARDHANA RAY, *Star Factories: The Birth of Stars and Planets*, Raintree/Steck Vaughn, 2000 (per ragazzi).

Numerosi link a siti Internet si trovano all'indirizzo: astro.caltech.edu/~lah/starformation.html

Il circuito della sessualità maschile

di Irwin Goldstein
e del Gruppo di studio sul meccanismo centrale nelle disfunzioni erettili

La comprensione dei meccanismi che regolano erezione e detumescenza del pene condurrà presto alla messa a punto di terapie per milioni di uomini che soffrono di disfunzioni erettili

Cinquecento anni fa Leonardo da Vinci fece una osservazione circa il pene che suona vera ancora oggi per molti uomini e per le loro compagne. Lo scienziato rinascimentale, inventore e artista, osservò che questo capriccioso organo ha una propria volontà: «Questa [la verga] conferisce collo intelletto umano e ancora che la volontà dell'omo lo voglia provocare esso sta ostinato e fa a suo modo alcune volte movendosi da se senza licenza o posieri [= pensieri] dell'omo, così dormiente come desto fa quello che desidera e spesso l'omo dorme e lui sta veglio molte volte l'omo veglia e lui dorme. Molte volte l'omo lo vole esercitare e lui non vole, molte volte lui vole e l'omo gliel vieta. Adunque pare che questo animale abbia spesso animo e intelletto separato dall'omo...» (Windsor 19030r, An B 13r).

Leonardo, che dissezionò peni provenienti da cadaveri di condannati all'impiccagione, fu il primo a riconoscere che, durante un'erezione, il pene si riempie di sangue. Quanto all'idea che il pene agisca per propria libera volontà, tuttavia, il Nostro sbagliava. Lungi dall'avere una mente autonoma, oggi si sa che il pene è sotto il completo controllo del sistema nervoso centrale, cioè del cervello e del midollo spinale. Come ha notato William D. Steers, del Dipartimento di urologia dell'Università della Virginia, qualsiasi disturbo alla rete di vie nervose che connette il pene al sistema nervoso centrale può condurre a problemi di erezione.

Negli ultimi decenni lo studio dell'erezione è stato ridefinito. Ora abbiamo una migliore comprensione dei processi all'interno del pene che conducono all'erezione e alla detumescenza, il ritorno del pene allo stato flaccido. Armati di questa conoscenza, abbiamo iniziato a esplorare come il cervello e il midollo spinale controllino l'erezione e altre funzioni sessuali. Il campo di ricerca è ancora giovane, ma confidiamo che questi sforzi possano condurre a nuove terapie non solo per i milioni di uomini che soffrono di disfunzioni sessuali, ma anche per le donne che presentano analoghe disfunzioni.

Un'erezione è una serie attentamente orchestrata di eventi, con il sistema nervoso centrale nel ruolo del direttore d'orchestra. Persino quando il pene è a riposo, il sistema nervoso è al lavoro. Quando un uomo non è sessualmente eccitato, parte del sistema nervoso simpatico limita attivamente il flusso di sangue al pene, tenendolo flaccido. Il sistema nervoso simpatico è uno dei due rami del sistema nervoso autonomo, la parte del sistema nervoso centrale che è deputata al controllo delle risposte «automatiche» dell'organismo come la pressione sanguigna e la frequenza cardiaca.

Un equilibrio dinamico

All'interno del pene, e attraverso tutto il sistema nervoso, la risposta sessuale di un uomo riflette un equilibrio dinamico fra forze eccitatorie e forze inibitorie. Mentre il sistema nervoso simpatico tende a inibire l'erezione, il sistema parasimpatico - l'altro ramo del sistema nervoso autonomo - è uno fra i diversi possibili percorsi eccitatori. I segnali che provocano l'erezione possono aver origine nel cervello, provocati forse da un odore o dalla vista o dal pensiero di una partner attraente, o dalla stimolazione fisica dei genitali.

Incuranti della provenienza dei segnali, i nervi eccitatori nel pene reagiscono rilasciando neurotrasmettitori proerettili, tra cui l'ossido di azoto e l'acetilcolina. Questi messaggeri chimici ordinano ai muscoli che controllano le arterie del pene di rilassarsi, causando un maggior afflusso di sangue nell'organo. I corpi cavernosi all'interno del pene si riempiono così di sangue e la loro espansione comprime le vene che drenano il sangue dal pene, fino al punto da chiuderle quasi completamente e da intrappolare il sangue. Si produce così una erezione. (Il sildenafil - principio attivo del Viagra - funziona rallentando la distruzione di una delle sostanze che mantengono i muscoli rilassati, e quindi facilita l'erezione.)

Durante un'erezione, il pene non solo riceve segnali dai nervi, ma ne invia anche al midollo spinale e al cervello. Il pene ha una densità insolitamente alta di recettori tattili specializzati; quando questi recettori sono stimolati, i loro segnali corrono al midollo spinale e al cervello, dove influenzano il percorso dei segnali nervosi generati nei centri superiori. Così, sebbene il pene non «pensi» di per sé, tiene il cervello e il midollo spinale bene informati circa le sue sensazioni. Una volta raggiunto l'orgasmo o in seguito a una caduta dell'eccitazione, l'erezione rientra velocemente. Il sistema nervoso simpatico limita nuovamente il flusso di sangue nel pene, che ritorna flaccido.

Questa antica erma (pilastro quadrato) greca, risalente al 510 a.C., ben rappresenta quella connessione fra il cervello e il pene, per tanto tempo misconosciuta, che è oggi oggetto di molte ricerche.

Giraudon/Art Resource

Circostanze che incrementino l'attività del sistema nervoso simpatico - come lo stress o il freddo - possono ulteriormente ridurre il pene, rendendolo ancora più flaccido. Ugualmente, il blocco dell'attività del sistema nervoso simpatico aumenta l'erezione. Le erezioni notturne sono un buon esempio di questo fenomeno. Queste ricorrono principalmente durante il sonno caratterizzato dai movimenti oculari rapidi (REM), lo stadio in cui avvengono i sogni. Durante il sonno REM, i neuroni del sistema simpatico vengono inattivati nel *locus coeruleus*, un'area specifica del tronco cerebrale, la parte del cervello che si connette al midollo spinale. Secondo una teoria, quando questo centro cerebrale del sistema simpatico è inattivo, i percorsi nervosi proerettili predominano, inducendo le erezioni notturne. (Episodi di eccitazione notturna avvengono anche nelle donne. Quattro o cinque volte per notte - cioè durante ogni episodio REM - le donne hanno le labbra dei genitali, la vagina e il clitoride inturgiditi dall'afflusso di sangue.)

Il cervello è il più importante organo sessuale: nel maschio ha anche la funzione di tenere sotto controllo il pene.

Alcune erezioni, chiamate erezioni riflesse, sono generate interamente nel midollo spinale. Come il toccare con un dito un fornello acceso provoca un rapido ritiro della mano, in alcune situazioni la stimolazione fisica del pene può causare un riflesso erettile. La riproduzione è così cruciale per la perpetuazione della nostra specie che la capacità di creare un'erezione sembra essere stata prevista anche nei circuiti nervosi posti presso la base della colonna vertebrale. Negli umani, la maggior parte delle prove che hanno portato a questa scoperta è venuta dalle osservazioni su soldati con ferite al midollo spinale, e in particolare su feriti nella seconda guerra mondiale. Prima di allora si credeva comunemente che uomini con ferite al midollo spinale fossero permanentemente e completamente impotenti e sterili. Sebbene ora si sappia che questa affermazione è errata, essa è intuitivamente plausibile. Il midollo spinale, fungendo da tramite per gli stimoli nervosi fra il cervello e i nervi periferici del resto del corpo, è l'autostrada del sistema nervoso. Se è danneggiato, questo flusso di impulsi nervosi può essere interrotto in una miriade di modi differenti, a seconda di dove la ferita è avvenuta e di quanto estesa essa sia.

Nonostante ciò, come riportò Herbert Talbot in uno studio classico del 1949, uomini con gravi o devastanti danni alla spina dorsale spesso continuano ad avere erezioni. Nella sua indagine su 200 uomini affetti da paraplegia scoprì che due terzi di essi erano capaci di ottenere un'erezione, e alcuni di avere rapporti sessuali completi e di arrivare all'orgasmo. Sebbene le ferite di guerra avessero lasciato molti di loro paralizzati e incapaci di controllare molte funzioni fisiologiche di base, la loro capacità di erezione era spesso conservata.

Queste osservazioni - e informazioni da studi su animali condotti fin dagli anni novanta del XIX secolo - hanno portato alla scoperta che un «centro generatore di erezioni» è situato nel segmento sacrale del midollo spinale (cioè, poco sopra il coccige, fra la vertebra S3 e la T12). Stimolazioni fisiche del pene inviano segnali sensori a questo centro per erezioni attraverso il nervo pudendo. I segnali in arrivo attivano cellule nervose di connessione chiamate interneuroni, che a loro volta stimolano i neuroni parasimpatici vicini. Questi neuroni inviano segnali di induzione dell'erezione dal midollo spinale ai vasi sanguigni del pene. Finché quest'arco riflesso rimane intatto, l'erezione è possibile.

I freni del cervello

Osservazioni condotte su uomini e animali da laboratorio con il midollo spinale danneggiato hanno consentito un'altra interessante scoperta: quando il cervello è scollegato dal centro di generazione delle erezioni nel midollo spinale, queste avvengono più frequentemente e richiedono meno stimolazione tattile di quanto avvenisse prima della ferita. Nel 1979 Benjamin D. Sa-

L'erezione è orchestrata dal sistema nervoso centrale. Le erezioni sono continuamente inibite dal sistema nervoso simpatico (*in blu*). Durante il sonno REM, tuttavia, quando i neuroni del sistema simpatico nel locus coeruleus sono inattivati, le erezioni avvengono spontaneamente. L'altra struttura cerebrale che inibisce l'erezione è il nucleo paragigantocellulare. Al contrario, il sistema parasimpatico (*in rosso*) è eccitatorio. Stimoli tattili o segnali elaborati dalla corteccia possono essere integrati nel nucleo paraventricolare e nel nucleo preottico mediale, inducendo un'erezione. Alcune erezioni (dette riflesse) sono determinate interamente dal centro di generazione delle erezioni, che si trova nel tratto del midollo spinale posto fra le vertebre S3 e T12.

John W. Karapelou

chs, psicologo sperimentale alla Connecticut University, trovò, per esempio, che nei ratti la resezione del midollo spinale causava un incremento di oltre 10 volte nel numero di erezioni e una riduzione del 94 per cento del tempo necessario per ottenere un'erezione.

Apparentemente, sconnettendo il cervello dal corpo, alcuni controlli inibitori sull'erezione venivano rimossi; in effetti, anni dopo venne provato che le cose stavano proprio così. Nel 1990 Kevin E. McKenna e Lesley Marson, fisiologi alla Northwestern University, identificarono il centro cerebrale che invia lungo il midollo spinale segnali che frenano le erezioni. I due ricercatori trovarono che uno specifico ammasso di neuroni nel mesencefalo comanda questo tipo di inibizione centrale. Quando distrussero questo gruppo di neuroni - detto nucleo paragigantocellulare o PGN - nel cervello di un ratto maschio, l'inibizione scomparve, causando più frequenti e intense erezioni.

Questi ricercatori fecero anche una altra significativa scoperta: i neuroni del PGN inviano la maggior parte dei loro assoni fino ai neuroni preposti alla generazione di erezioni nella parte bassa della spina dorsale. Là le terminazioni dei nervi provenienti dal PGN rilasciano il neurotrasmettitore serotonina, un messaggero chimico che inibisce l'erezione opponendosi agli effetti dei neurotrasmettitori proerettili.

Questa scoperta potrebbe avere importanti implicazioni per i milioni di uomini e donne che assumono farmaci serotoninergici per curare la depressione. Diffusi farmaci che appartengono alla classe degli inibitori selettivi del riassorbimento della serotonina (SSRI) funzionano in parte incrementando il livello cerebrale di serotonina. Questi farmaci spesso causano disfunzioni sessuali come effetto collaterale, ritardando o bloccando l'eiaculazione negli uomini e, nelle donne, riducendo il desiderio sessuale e rendendo difficile il raggiungimento dell'orgasmo.

Il lavoro di McKenna e dei suo colleghi fornisce una spiegazione di come questo effetto collaterale potrebbe prodursi. Incrementando la serotonina nel sistema nervoso centrale, in alcune persone gli SSRI potrebbero «spingere» i freni cerebrali su erezione, eiaculazione e altre funzioni sessuali. Come spesso accade in medicina, tuttavia, un effetto collaterale in una persona può essere la terapia per un'altra: le proprietà inibitorie degli SSRI sono di aiuto per quanti soffrono di eiaculazione precoce, una condizione in cui un uomo raggiunge l'orgasmo troppo velocemente, prima della penetrazione in vagina o pochi secondi dopo. Gli SSRI sono efficaci nel ritardare l'orgasmo, probabilmente per la loro capacità di aumentare l'inibizione centrale. Sebbene siano necessari altri studi, gli SSRI potrebbero anche essere promettenti nel trattare disordini sessuali associati a eccessivi o inappropriati desideri sessuali.

Considerando che è il sesso a far girare il mondo o, quantomeno, che ci mantiene come specie sul pianeta, non è chiaro perché si siano evoluti questi elaborati controlli inibitori. Sebbene nessuno lo sappia per certo, sono state avanzate alcune suggestive teorie. John Bancroft dell'Indiana University crede che per la maggior parte degli uomini questa inibizione centrale sia adattativa, così da tenerli al riparo dai problemi che potrebbero sorgere dall'eccessiva o rischiosa ricerca del piacere sessuale. Questi freni interni potrebbero anche aiutare l'uomo a evitare eiaculazioni multiple durante gli incontri sessuali, che potrebbero diminuire la sua riserva di sperma e ridurne la fertilità.

Peraltro, come molti piaceri della vita, un'erezione può diventare un problema se dura troppo a lungo. Un'erezione che persista più di 4 ore - un fenomeno che può accadere in particolari situazioni patologiche o in seguito all'assunzione di certi farmaci - è considerata un'emergenza medica. Chiamata priapismo, questa condizione intrappola il sangue all'interno del pene, causando danni permanenti se non è prontamente curata: se non si riesce a far pervenire nuovo sangue ossigenato all'interno del pene, i tessuti possono iniziare a morire.

John W. Karapelou

La congestione ematica inizia quando i neuroni rilasciano trasmettitori che si diffondono nella muscolatura liscia intorno alle arterie del pene, permettendo alle cellule, normalmente contratte, di rilasciarsi e al sangue di fluire all'interno (*sopra*). Quando le arterie si rilasciano, le fibre muscolari si allungano, premendo contro le vene che drenano il sangue dal pene. Il sangue resta così intrappolato nelle cavità (cavernule) fra le cellule muscolari, e il pene diventa eretto (*sotto*).

Nonostante i benefici dell'inibizione centrale per la maggior parte degli uomini, Bancroft ritiene che essa possa causare problemi in altri, se è troppo forte o troppo debole. Se l'inibizione centrale è eccessiva - diciamo se i livelli cerebrali di serotonina sono troppo alti - il soggetto può soffrire di disfunzioni sessuali. Al contrario, se l'inibizione centrale è troppo debole, potrebbe essere incline a comportamenti sessuali ad alto rischio: nella ricerca della gratificazione sessuale potrebbe essere per esempio portato a ignorare i rischi delle malattie a trasmissione sessuale.

Dentro il cervello

Molte sono le regioni cerebrali che contribuiscono alla risposta sessuale maschile, da centri nel mesencefalo ad aree nella corteccia. I siti identificati finora appaiono estesamente interconnessi e ci inducono a pensare che il controllo del cervello sulla funzione sessuale operi come una rete unificata. In altre parole, il controllo dell'erezione non sembra organizzato in una catena di comando rigidamente connessa, ma è piuttosto distribuito fra aree multiple di cervello e midollo spinale. Per cui, se pure una di queste regioni subisce un danno, la capacità di avere erezioni spesso non viene compromessa.

Una delle regioni importanti del cervello che regolano il comportamento sessuale è l'ipotalamo. Quest'area svolge un ruolo vitale nel connettere i sistemi nervoso ed endocrino, o ormonale, ed è coinvolta nel controllo di comportamenti fondamentali, come la nutrizione e l'aggressività. Un ammasso di neuroni nell'ipotalamo, il nucleo preottico mediale, sembra avere un ruolo cruciale nella funzione sessuale.

François Giuliano della Facoltà di medicina della Université Paris-Sud e i suoi colleghi hanno recentemente mostrato che stimoli elettrici o chimici del nucleo preottico mediale causano erezioni nei ratti. Esso appare integrare stimoli da molte aree del cervello, aiutando a organizzare e dirigere la complessa struttura del comportamento sessuale. Alcuni scienziati ipotizzano

che questa area potrebbe essere coinvolta anche nel riconoscimento di un potenziale partner sessuale.

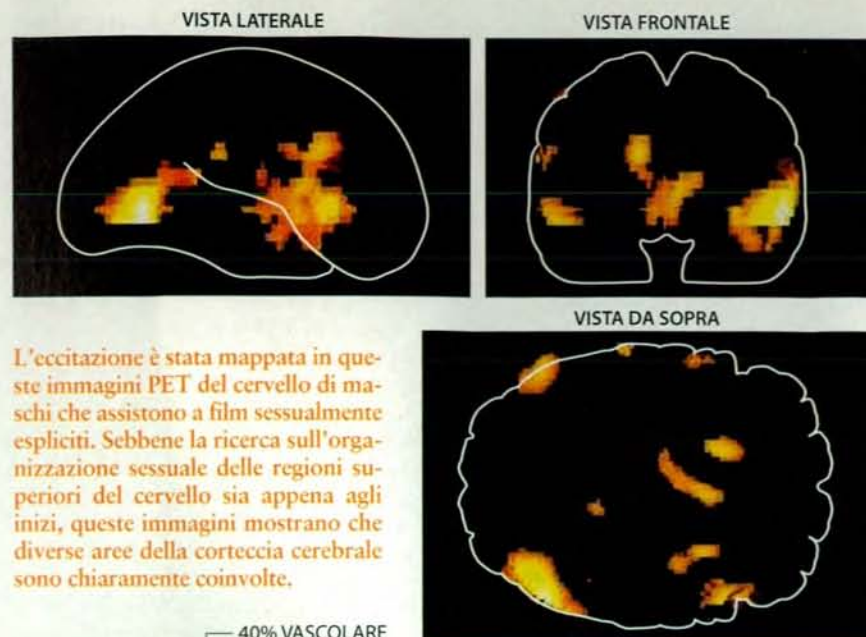
L'ipotalamo contiene anche il nucleo paraventricolare, un altro gruppo di neuroni con un importante ruolo nella funzione sessuale maschile. Come quello preottico mediale, questo nucleo è un centro di elaborazione che invia e riceve messaggi da differenti parti del cervello e del midollo spinale. Durante l'eccitazione sessuale, il nucleo paraventricolare rilascia ossitocina. Si sa da tempo che questo ormone stimola la secrezione di latte nelle donne che allattano e le contrazioni uterine durante il parto; in molte specie l'ossitocina è il messaggero chimico dell'«amore», che promuove i legami madre-figlio e la coesione sociale. Si è anche scoperto che questo ormone è un neurotrasmettitore cerebrale che ha un potente effetto proerettile negli uomini. Come altri neurotrasmettitori, l'ossitocina si lega a neuroni bersaglio e regola la conduzione degli impulsi nervosi. In questo caso, l'ossitocina attiva le vie nervose eccitatorie che corrono dal centro spinale di generazione delle erezioni al pene.

I centri cerebrali superiori sono pure coinvolti nella risposta sessuale maschile, ma riguardo a loro sappiamo molto meno. Nonostante ciò, i pochi studi compiuti fino a oggi hanno fornito interessanti risultati. Serge Stoleru dell'Inserm a Parigi ha usato la tomografia a emissione di positroni (PET) per rivelare quali parti della corteccia cerebrale si attivano quando gli uomini sono sessualmente eccitati. Egli ha confrontato immagini PET ottenute da un gruppo di uomini a cui erano stati mostrati tre tipi di film: sessualmente espliciti, umoristici ed emozionalmente neutri. Stoleru ha scoperto che quando gli uomini erano sessualmente eccitati, parti specifiche della corteccia cerebrale si attivavano, incluse regioni associate con l'esperienza emozionale e il controllo del sistema nervoso autonomo.

Oltre a ciò, alcuni ricercatori stanno esplorando come le funzioni superiori del cervello, come la memoria e l'apprendimento, aiutino a controllare le erezioni. Lo psicologo Raymond Rosen della Robert Wood Johnson Medical School di New Brunswick, nel New Jersey, ha dimostrato che uomini sani possono imparare ad avere erezioni a richiesta, in risposta a immagini mentali o stimoli non sessuali. In uno studio, i soggetti furono istruiti a usare le loro menti per eccitarsi in cambio di una ricompensa in denaro. I soggetti impararono rapidamente ad aumentare le loro erezioni in assenza di dirette stimolazioni fisiche, visualizzando immagini e fantasie eccitanti. Per mantenere alta la motivazione, gli uomini guadagnavano denaro in proporzione al numero e all'intensità delle erezioni.

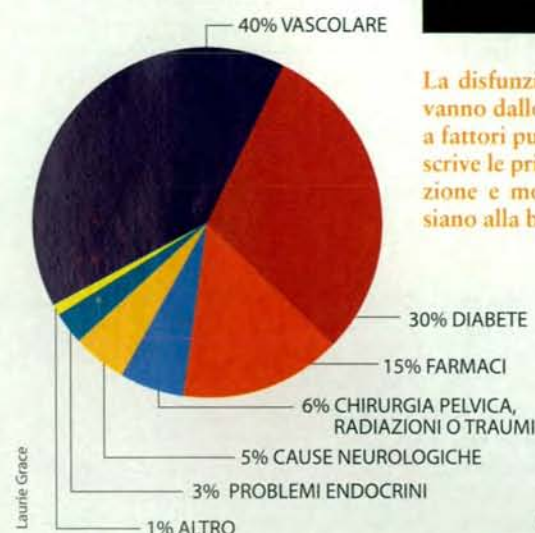
VISTA LATERALE

VISTA FRONTALE

VISTA DA SOPRA

L'eccitazione è stata mappata in queste immagini PET del cervello di maschi che assistono a film sessualmente espliciti. Sebbene la ricerca sull'organizzazione sessuale delle regioni superiori del cervello sia appena agli inizi, queste immagini mostrano che diverse aree della corteccia cerebrale sono chiaramente coinvolte.

Cortesia Serge Stoleru *Inserm*

40% VASCOLARE
30% DIABETE
15% FARMACI
6% CHIRURGIA PELVICA, RADIAZIONI O TRAUMI
5% CAUSE NEUROLOGICHE
3% PROBLEMI ENDOCRINI
1% ALTRO

Laurie Grace

La disfunzione erettile ha molte cause, che vanno dallo stress e altri disturbi psicologici a fattori puramente fisiologici. Il grafico descrive le principali cause fisiche della disfunzione e mostra come i problemi vascolari siano alla base di un ampio numero di casi.

Questo esperimento è uno dei tanti che mostrano come l'apprendimento e la memoria influenzino fortemente le erezioni. Inoltre, l'abilità del cervello di associare l'eccitazione sessuale e l'orgasmo con stimoli non sessuali aiuta a spiegare perché gli oggetti-feticcio - come scarpe, guaine di cuoio e biancheria intima - possano spesso aumentare l'eccitazione sessuale.

Quando le cose non funzionano

Comprendendo il ruolo del sistema nervoso centrale nel controllo delle erezioni e delle altre funzioni sessuali speriamo di preparare le basi per nuove terapie. La disfunzione erettile, definita come una costante inabilità a ottenere o mantenere una erezione soddisfacente per la prestazione sessuale, è un problema sempre più comune. Uno studio che abbiamo condotto alcuni anni fa nell'area di Boston stima che diversi gradi di disfunzione erettile affliggano circa il 40 per cento degli uomini sopra i 40 anni e circa il 70 per cento di quelli di 70 anni. Stimiamo che con l'invecchiamento della popolazione il numero di uomini che soffrono di questa condizione sia destinato a più che raddoppiare nei prossimi 25 anni, arrivando a oltre 330 milioni.

Se gli stimoli nervosi non possono raggiungere il pene per qualsiasi ragione, un problema di erezione è inevitabile. Queste disfunzioni possono anche essere una complicazione dell'asportazione della prostata, in quanto questa operazione può ledere i nervi del pene. Anche il diabete può comportare danni a nervi e vasi sanguigni nel pene. Molte malattie neurologiche - come traumi alla spina dorsale, Parkinson, sclerosi multipla e ictus - possono causare questo genere di problemi. E dato che l'umore e il benessere di un uomo influiscono sul flusso di messaggi nervosi al pene, non è sorprendente che stress, depressione, ansia o rabbia spesso siano alla base di difficoltà nell'erezione.

Grazie alle crescenti conoscenze sulle modalità con cui il cervello controlla le erezioni, i ricercatori hanno iniziato a sviluppare medicinali che agiscono sul sistema nervoso centrale.

L'apomorfina sarà molto probabilmente il primo dei farmaci di una nuova generazione che agiscono direttamente sul cervello invece che sul pene, come fa il sildenafil. L'apomorfina imita il neurotrasmettitore dopammina e intensifica le erezioni legandosi a recettori specifici situtati su cellule nervose nel nucleo paraventricolare e nel nucleo preottico mediale, attivando i circuiti nervosi proerettili.

Sebbene il composto sia usato da più di un secolo - anche per il trattamento del morbo di Parkinson - solo alla metà degli anni ottanta alcuni ricercatori, fra i quali R. Taylor Segraves, psichiatra alla Case Western Reserve University, e Jeremy P. W. Heaton, urologo alla Queen's University, in Ontario, iniziarono a sperimentarlo sulla disfunzione erettile. Da allora, studi clinici hanno valutato gli effetti dell'apomorfina in più di 3000 soggetti, trovando che essa può trattare con successo molti tipi di disfunzione erettile.

Come tutti i medicinali, l'apomorfina può causare effetti secondari indesiderati. Se il sildenafil, il medicinale più largamente prescritto per la disfunzione erettile, può causare mal di testa, congestione nasale e afflusso di sangue al viso, l'apomorfina può indurre nausea durante il suo uso iniziale. In futuro, potremmo riuscire a trattare alcuni pazienti in maniera più efficace combinando apomorfina con terapie che agiscono a livello del pene.

Secondo diversi studi l'impotenza aumenta con l'età. In 25 anni, dato l'invecchiamento della popolazione mondiale, si stima che questa condizione potrebbe riguardare più di 330 milioni di uomini.

Il sesso e i sessi

Fino a poco tempo fa, la maggior parte della ricerca sulla funzione sessuale si concentrava in larga parte sugli uomini e sul controllo dell'erezione del pene. Fortunatamente questo sta cambiando, vista la sempre maggiore consapevolezza che le disfunzioni sessuali sono estremamente comuni - e curabili - in entrambi i sessi. Infatti, un recente studio condotto su più di 3000 americani ha rivelato che il numero delle donne che lamentavano disturbi sessuali era superiore a quello dei maschi: 43 per cento contro il 31 per cento.

Il nostro laboratorio sta attualmente conducendo un trial clinico per determinare se l'apomorfina possa aumentare l'eccitazione sessuale nelle donne che soffrono di questo genere di problemi. Stiamo anche provando un nuovo, e già approvato dalla FDA, dispositivo chiamato «EROS-dispositivo di terapia clitoridea», che aumenta il flusso di sangue al clitoride tramite una delicata suzione. In donne che soffrono di disfunzioni sessuali, si è constatato che esso migliora la percezione delle sensazioni sessuali, la lubrificazione e l'orgasmo, e in generale la soddisfazione.

La ricerca ci ha reso consapevoli di alcune similitudini fra i sessi nel controllo dell'eccitazione sessuale, dell'orgasmo e di varie altre funzioni sessuali da parte del sistema nervoso centrale. Prove preliminari suggeriscono che il controllo centrale della funzione sessuale negli uomini e nelle donne sia notevolmente simile.

L'ultimo decennio ha rivoluzionato non solo il campo delle ricerche sull'erezione ma anche l'atteggiamento della nostra società circa la salute sessuale. Solo pochi anni fa la disfunzione erettile era generalmente non curata. Oggi questa condizione e altri problemi sessuali sono apertamente riconosciuti e discussi. Milioni di uomini ricevono cure per i loro problemi erettili, grazie a una sempre crescente comprensione dell'importanza della salute sessuale e alla disponibilità di più efficaci terapie. Prevediamo che nel prossimo futuro ci sarà una disponibilità ancora maggiore di terapie sia per gli uomini che per le donne. Inoltre, grazie agli approfondimenti sul ruolo del cervello nel controllo della nostra sessualità, ci stiamo muovendo verso una concezione più olistica del benessere sessuale, che integri mente e corpo e risponda ai bisogni peculiari di entrambi i sessi.

IRWIN GOLDSTEIN è urologo alla Boston University. Fa parte del «Gruppo di studio sul meccanismo centrale nelle disfunzioni erettili». Gli altri membri del Gruppo sono: John Bancroft dell'Indiana University; François Giuliano della Facoltà di medicina dell'Université Paris-Sud; Jeremy P. W. Heaton della Queen's University, Ontario; Ronald W. Lewis del Medical College of Georgia; Tom F. Lue dell'Università della California a San Francisco; Kevin E. McKenna della Northwestern University; Harin Padma-Nathan della University of Southern California; Raymond Rosen della Robert Wood Johnson Medical School; Benjamin D. Sachs dell'Università del Connecticut; R. Taylor Segraves della Case Western Reserve University; William D. Steers dell'Università della Virginia.

FELDMAN H. A. e altri, *Impotence and Its Medical and Psychological Correlates: Results of the Massachusetts Male Aging Study* in «Journal of Urology», 151, n.1, gennaio 1994.

GIULIANO F., RAMPIN O., BENOIT G. e JARDIN A., *Neural Control of Penile Erection* in «Urology Clinics of North America», 22, n. 4, novembre 1995.

McKENNA K., *The Brain Is the Master Organ in Sexual Function: Central Nervous System Control of Male and Female Sexual Function* in «International Journal of Impotence Research», 11, supplemento 1, pp. 548-555, 1999.

LAUMANN E. O., PAIK A. e ROSEN R. C., *Sexual Dysfunction in the United States: Prevalence and Predictors* in «Journal of the American Medical Association», 281, n. 6, 10 febbraio 1999.

Chi erano i neandertaliani?

Dati controversi indicano che questi ominidi si incrociarono con esseri umani anatomicamente moderni e che a volte si comportarono in modi sorprendentemente attuali

di Kate Wong, redazione di «Scientific American»

Era una storia così chiara e semplice. Non essendo in grado di competere con gli esseri umani anatomicamente moderni, portatori di una tecnologia e di una cultura più sofisticate, i neandertaliani - una specie umana distinta - furono rapidamente condotti all'estinzione dagli invasori moderni, nostri antenati. Ma le ricostruzioni del passato troppo chiare e semplici tendono a mostrare la corda, e la storia dei neandertaliani, a quanto sembra, non fa eccezione. Per oltre 200 000 anni, questi ominidi dal cervello voluminoso occuparono l'Europa e l'Asia occidentale, combattendo il freddo terribile dei periodi glaciali più intensi e i pericoli quotidiani della vita preistorica. Oggi non esistono più. Ma al di là di questi due fatti certi, i paleoantropologi discutono aspramente su chi fossero i neandertaliani, come vivessero e quale sia stata la loro sorte.

Il tentativo di risolvere questi elusivi problemi è solo un aspetto della disputa relativa all'evoluzione degli esseri umani moderni. Alcuni ricercatori affermano che la nostra specie apparve circa 200 000 anni fa in Africa e da quel momento cominciò a rimpiazzare gli ominidi più arcaici in tutto il mondo; altri studiosi propongono che le popolazioni più antiche abbiano contribuito al genoma di quei primi esseri umani moderni. Essendo i meglio conosciuti tra questi gruppi arcaici, i neandertaliani sono al centro della controversia sulle nostre origini. Ma non si tratta solo di una discussione accademica su eventi di un passato remoto: studiando la biologia e il comportamento dei neandertaliani, è necessario affrontare il concetto stesso di che cosa significhi essere umani e che cosa - se esiste - renda noi, umani moderni, unici. E infatti, ispirati dalle più recenti scoperte, paleoantropologi e archeologi stanno sempre più chiedendosi: «Quanto erano simili a noi i neandertaliani?».

Il confronto fra neandertaliani e umani moderni attira l'attenzione dei ricercatori fin dalla scoperta di uno scheletro incompleto nella valle del Neander, in Germania, avvenuta nel 1856. I resti - cranio massiccio con la tipica arcata sopracciliare pronunciata e robuste ossa degli arti - erano chiaramente diversi dalle ossa di tipo moderno e furono assegnati a una nuova specie, *Homo neanderthalensis* (anche allora, però, ci furono disaccordi: alcuni scienziati tedeschi proposero che fossero i resti di un cosacco malformato). Ma fu la scoperta del famoso «vecchio» di La Chapelle-aux-Saints in Francia, quasi 50 anni dopo, a condurre alla caratterizzazione dei neandertaliani come protoumani primitivi. Le ricostruzioni di allora li mostravano come bruti curvi, goffi e scimmieschi, in stridente contrasto con i diritti e aggraziati *Homo sapiens*. I neandertaliani sembravano rappresentare niente altro che un ottuso orco che sbirciava da dietro la soglia evolutiva dell'umanità.

Decenni più tardi, il riesame dell'individuo di La Chapelle rivelò che certi tratti anatomici erano stati male interpretati. In effetti postura e movimenti dei neandertaliani dovevano essere uguali ai nostri. Da allora i paleoantropologi si sono chiesti se le caratteristiche morfologiche che caratterizzano i neandertaliani come gruppo - come la robustezza dello scheletro, gli arti tozzi e il torace «a barile», l'arcata sopracciliare sporgente, la fronte bassa e sfuggente, il prognatismo facciale e la mancanza di mento - giustifichino la loro assegnazione a una specie separata dalla nostra. È chiaro che alcune di queste caratteristiche rappresentano un adattamento all'ambiente: le proporzioni del loro corpo, per esempio, permettevano una più efficiente conservazione del calore nei gelidi inverni glaciali. Altre caratteristiche, però, come l'arcata sopracciliare sporgente, non hanno una chiara funzione, ma sembrano riflettere la deriva genetica tipica delle popolazioni isolate.

Per gli studiosi che accettano il modello della sostituzione delle popolazioni, la morfologia distinta dei neandertaliani è il chiaro risultato di una traiettoria evolu-

Il riflesso del passato rivela un volto al contempo familiare ed estraneo. Il cranio di una donna adulta risalente a 130 000 anni fa, trovato nel riparo sotto roccia di Krapina, nella Croazia nordoccidentale, ha ispirato questa ricostruzione artistica.

Museo di storia naturale della Croazia

tiva separata da quella seguita dagli esseri umani moderni. Ma da vari anni un altro gruppo di ricercatori contesta questa interpretazione, affermando che molte delle caratteristiche tipiche dei neandertaliani sono state riscontrate anche nei primi europei moderni che li seguirono. «I neandertaliani possiedono una serie di caratteristiche che sono, nel complesso, differenti dalle nostre; ma si tratta di una differenza di frequenza, non di una differenza assoluta» afferma David W. Frayer, paleoantropologo all'Università del Kansas. «Pressoché tutti i loro tratti si trovano in altri fossili umani.»

Frayer fa l'esempio di uno dei più antichi europei moderni noti, un fossile dal sito di Vogelherd, nella Germania sudoccidentale, che combina la forma del cranio tipica dei moderni con caratteristiche tipicamente neandertaliane, come lo spazio fra l'ultimo molare e il ramo ascendente della mandibola e la forma del foramen mandibolare (un canale per il passaggio del nervo). Ulteriori prove, secondo Frayer e Milford H. Wolpoff dell'Università del Michigan, vengono da un gruppo di umani moderni primitivi scoperti in Moravia, nel sito di Mladeč. Secondo i due ricercatori, la popolazione di Mladeč presentava caratteri cranici che altri scienziati hanno descritto come peculiari dei neandertaliani.

Sebbene questo genere di dati fosse un tempo usato per dimostrare come i neandertaliani si fossero gradualmente evoluti in europei moderni, oggi il punto di vista è abbastanza diverso. «È chiaro che arrivarono in Europa da fuori, sicché le popolazioni successive devono essere una mescolanza di neandertaliani e di questi nuovi arrivati» dice Wolpoff, il quale ritiene che i due gruppi non differiscano più di quanto gli europei di oggi sono diversi dagli aborigeni australiani. Secondo Fred H. Smith, paleoantropologo della Northern Illinois University, prove di un mescolamento appaiono anche nei fossili tardi di neandertaliani. I resti di neandertaliani ritrovati nella grotta di Vindija, nella Croazia nordoccidentale, riflettono «l'assimilazione di alcune caratteristiche moderne»: un'arcata sopracciliare meno pronunciata e un accenno di mento.

Quanti considerano i neandertaliani una specie separata, tuttavia, affermano che i fossili di Vindija sono troppo frammentari per essere decisivi e che le similitudini fra i due gruppi potrebbero essere il frutto di convergenza evolutiva. Questi ricercatori rifiutano anche l'ipotesi dell'incrocio riguardo agli esseri umani moderni di Mladeč: «Se guardo alla loro morfologia, vedo una grande robustezza, ma non tratti realmente neandertaliani» afferma Christopher B. Stringer del Natural History Museum di Londra.

Un'altra ragione per dubitare delle teorie a favore dell'incrocio fra esseri umani moderni e neandertaliani - affermano alcuni scienziati - è che esse contraddicono le conclusioni raggiunte da Svante Pääbo, allora all'Università di Monaco di Baviera, e colleghi, che nel luglio 1997 annunciarono di aver recuperato e analizzato il DNA mitocondriale (mtDNA) da un fossile di neandertaliano. La copertina della rivista «Cell», che pubblicava il loro resoconto, diceva già tutto: *I neandertaliani non sono nostri antenati*. Dal breve tratto di mtDNA sequenziato, i ricercatori determinarono che le differenze fra il DNA mitocondriale dei neandertaliani e quello degli esseri umani attuali sono considerevolmente più grandi delle differenze trovate fra le popolazioni umane di oggi. Ma sebbene la questione sembrasse ormai risolta, non tutti i dubbi erano stati messi a tacere.

Nuovi fossili trovati in Europa occidentale hanno intensificato l'interesse per l'eventuale mescolamento di neandertaliani e umani moderni. Nel gennaio 1999 è stata annunciata la scoperta nella valle di Lapedo, nel Portogallo centrale, dello scheletro quasi completo di un bambino di circa 4 anni, sepolto 24 500 anni fa con le tipiche modalità del Gravettiano, una cultura associata ad alcuni fra i primi europei moderni. Secondo Erik Trinkaus della Washington University, Cidália Duarte dell'Istituto portoghese di archeologia a Lisbona e i loro colleghi, il fossile, denominato Lagar Velho 1, mostra una combinazione di caratteristiche neandertaliane e umane moderne che può essere solo il risultato di un notevole incrocio fra le due popolazioni.

Se l'ascendenza mista di Lagar Velho 1 reggerà a ulteriori indagini, l'idea che i neandertaliani fossero una variante della nostra specie riguadagnerà credito. I sostenitori del modello della sostituzione ammettono che possano essere avvenuti isolati episodi di mescolamento fra gli esseri umani moderni e le specie più arcaiche, perché anche altre specie fortemente correlate di mammiferi possono talvolta incrociarsi fra loro.

Neandertaliano

GRANDE SPORGENZA OCCIPITALE
FRONTE SFUGGENTE
ARCATA SOPRACCILIARE SPORGENTE
PROGNATISMO FACCIALE
SPAZIO DIETRO L'ULTIMO MOLARE
ASSENZA DI MENTO

Europeo di tipo moderno

PICCOLA SPORGENZA OCCIPITALE
FRONTE DIRITTA
ARCATA SOPRACCILIARE POCO EVIDENTE
ZONA FACCIALE VERTICALE
NESSUNO SPAZIO DIETRO I MOLARI; (L'ULTIMO MOLARE INFERIORE MANCA IN QUESTO CRANIO)
MENTO

Erik Trinkaus/Musée de l'Homme *(in alto)*; Archeologický Ústav Av Čr *(in basso)*

Sono mostrate le differenze morfologiche caratteristiche fra un neandertaliano, rappresentato dal fossile francese La Ferrassie 1, e un umano moderno, Dolní Věstonice 16, proveniente dalla Repubblica Ceca. Ciascun singolo tratto può essere riscontrato in entrambi i gruppi, variabile per grado e per frequenza, ma all'interno di un singolo gruppo essi tendono ad apparire come insiemi di caratteri.

Michael Rothman

Una ricostruzione artistica della vita dei neandertaliani di Grotte du Renne, in Francia. I livelli stratigrafici castelperroniani hanno fornito numerosi ciondoli e utensili complessi in osso e pietra. Questi oggetti e i resti di capanne e focolari erano un tempo associati ai soli umani moderni, ma le scoperte alla Grotte du Renne indicano che alcuni neandertaliani furono altrettanto industriosi.

Guida alla terminologia

- **Paleolitico:** o Età della pietra antica, è il periodo che va dalla comparsa di tracce di cultura alla fine dell'ultima glaciazione. È suddiviso a sua volta in inferiore, medio e superiore.
- **Musteriano:** è una cultura basata su utensili di pietra tipica del Paleolitico medio; è associata con i neandertaliani e i primi esseri umani moderni nel Vicino Oriente.
- **Aurignaziano:** è una cultura del Paleolitico superiore associata con gli esseri umani moderni. Include utensili elaborati e oggetti artistici.
- **Castelperroniano:** è una cultura del Paleolitico superiore associata con i neandertaliani. Assomiglia sia al Musteriano sia all'Aurignaziano.

Il bambino ibrido del Portogallo

di Erik Trinkaus e Cidália Duarte

Un freddo pomeriggio della fine di novembre 1998, mentre ispezionavano il riparo sotto roccia di Abrigo do Lagar Velho nella valle di Lapedo (Portogallo centrale), due prospettori archeologici notarono sedimenti incoerenti vicino a una tana di roditore alla base della parete di fondo della cavità. Sapendo che gli animali scavatori spesso portano in superficie materiale sepolto in profondità, uno di essi infilò la mano nel foro per vedere che cosa poteva essere venuto alla luce. Quando si rialzò, stringeva qualcosa di straordinario: ossa di un bambino sepolto quasi 25 000 anni fa.

Successivi scavi della sepoltura, condotti da uno di noi (Duarte), rivelarono che il bambino di 4 anni era stato interrato secondo un rituale di tipo gravettiano, associato a umani di tipo moderno in tutta Europa: coperto di ocra rossa, era stato deposto su un letto di vegetazione bruciata, assieme a denti di cervo perforati e una conchiglia marina. Data la brusca transizione culturale rilevata nei siti archeologici della Penisola iberica, sembrava probabile che, quando gli esseri umani moderni arrivarono nella regione a partire da 30 000 anni fa, avessero rimpiazzato rapidamente i nativi neandertaliani. Era perciò ragionevole che questo reperto, denominato Lagar Velho 1, fosse un bambino di questi primi immigrati moderni. In effetti, all'inizio non immaginammo che potesse essere nulla di diverso.

Questo scheletro meravigliosamente completo mostra in effetti una serie di tratti che si associano in gran parte a quelli dei primi europei moderni. Essi includono un mento ben delineato e altri dettagli della mandibola, gli incisivi piccoli, le caratteristiche proporzioni e inserzioni muscolari del pollice, la ristrettezza della parte anteriore del bacino e diversi dettagli della scapola e delle ossa dell'avambraccio. Eppure, stranamente, esso possiede anche un certo numero di caratteristiche che suggeriscono un'affinità con i neandertaliani: in particolare la parte anteriore della mandibola (che è inclinata all'indietro nonostante la presenza del mento), alcuni dettagli degli incisivi, i punti di inserzione dei muscoli pettorali, le proporzioni del ginocchio e le corte e robuste ossa della gamba. In definitiva il bambino di Lagar Velho sembra mostrare una complessa mescolanza di tratti neandertaliani e umani moderni.

Questo mosaico anatomico non è il risultato di qualche anomalia. Considerando i normali ritmi di crescita degli esseri umani, le nostre analisi indicano che, eccetto per una lesione dell'avambraccio, un paio di linee sulle ossa che indicano bruschi arresti della crescita (a causa di malattie o di carenza di cibo) e il fatto che morì così giovane, il bambino Lagar Velho 1 era sviluppato normalmente. La combinazione delle sue caratteristiche può solo derivare da una discendenza mista: qualcosa che non era mai stato documentato prima nell'Europa occidentale. Ne concludiamo che Lagar Velho 1 è il risultato di un incrocio fra i neandertaliani iberici indigeni e i primi umani moderni, che si diffusero nella Penisola Iberica a partire da 30 000 anni fa. Dato che il bambino visse migliaia di anni dopo l'epoca in cui si pensa siano scomparsi i neandertaliani, la sua anatomia probabilmente riflette un reale mescolamento delle due popolazioni quando ancora coesistevano, e non un raro e casuale accoppiamento fra un neandertaliano e un umano moderno.

Le ricerche sul campo condotte nell'estate 1999 hanno permesso di recuperare buona parte del cranio e quasi tutti i denti, insieme con altro materiale archeologico. Nel tentativo di comprendere pienamente questo notevole reperto, abbiamo organizzato un team di specialisti per analizzare più a fondo lo scheletro. Tra le indagini in programma ci sono tomografie computerizzate del cranio e delle ossa degli arti e una ricostruzione virtuale al calcolatore del cranio danneggiato. Sono necessari studi rigorosi perché la scoperta di un individuo con un tale mosaico di caratteristiche ha profonde implicazioni. Innanzitutto inficia il modello più estremo dell'origine africana, secondo il quale i primi esseri umani moderni, originatisi in Africa, in seguito soppiantarono tutti gli ominidi arcaici nel resto del mondo. L'anatomia del bambino di Lagar Velho, invece, propone uno scenario che combina la diffusione dall'Africa degli umani moderni e il loro mescolamento con le popolazioni arcaiche che incontravano. (La discendenza africana dei primi umani moderni è riflessa nelle ossa della gamba relativamente lunghe, un tipico adattamento alle condizioni tropicali, ma il bambino ha i metacarpi corti dei neandertaliani.)

Lagar Velho 1 dà anche indicazioni sulle somiglianze nel comportamento fra neandertaliani e primi esseri umani moderni. Benché i resti fossili indichino differenze anatomiche fra questi due gruppi, i loro modelli di adattamento, il comportamento sociale e i metodi di comunicazione (linguaggio incluso) non possono essere stati troppo in contrasto. Per i loro contemporanei, i neandertaliani erano solo un altro gruppo di cacciatori-raccoglitori, pienamente umani come loro stessi.

ERIK TRINKAUS è paleoantropologo presso la Washington University.
CIDÁLIA DUARTE sta completando il dottorato in antropologia all'Università dell'Alberta in Canada ed è specialista di osteologia umana all'Istituto portoghese di archeologia di Lisbona.

Il mosaico morfologico dello scheletro Lagar Velho 1, di 24 500 anni fa, indica che neandertaliani e umani moderni si incrociarono fra loro. Il fossile di bambino ha caratteri in gran parte moderni, ma ne possiede alcuni tipici dei neandertaliani.

José Paulo B. Ruas/Istituto portoghese di archeologia

Ma erano nostri antenati?

di Alessandro Saragosa

Per dire una parola definitiva su quali siano stati i rapporti di parentela fra neandertaliani e *Homo sapiens* l'ideale sarebbe analizzare a fondo i DNA, ricavando dalle somiglianze e differenze la distanza genetica che li separa. Purtroppo, quando si analizza il DNA estratto da ossa vecchie di decine di migliaia di anni, c'è il rischio di trovarsi con così poco materiale ancora leggibile e così contaminato da DNA contemporaneo da incorrere in clamorosi errori, come è accaduto, per esempio, nei tentativi di ricostruzione del materiale genetico di dinosauri.

Eppure, nel 1997, un'équipe di scienziati tedeschi e americani, guidata da Mark Stoneking e Svante Pääbo, è riuscita a estrarre DNA mitocondriale (mtDNA) da un pezzetto di omero di un neandertaliano trovato vicino a Düsseldorf. Il DNA dei mitocondri, organelli cellulari che derivano da quelli presenti nell'ovulo materno, è particolarmente adatto per l'analisi genetica dell'evoluzione: non essendo soggetto a ricombinazione sessuale, varia solo a causa di mutazioni casuali il cui ritmo è stimabile con buona precisione. La frequenza delle differenze nell'mtDNA di due specie ne indica così la distanza evolutiva, cioè a quando risale l'ultimo antenato comune. L'analisi dell'mtDNA del neandertaliano del 1997 fu condotta usando ogni possibile accorgimento atto a evitare contaminazioni e in due laboratori contemporaneamente. Il risultato fu una sequenza di 378 coppie di basi, ottenuta sovrapponendo i frammenti rimasti dopo forse 40 000 anni di fossilizzazione. Questo frammento è stato poi confrontato con l'analoga sequenza di mtDNA proveniente da 905 esseri umani di ogni razza. I risultati sono stati chiari. Le differenze fra gli umani attuali sono in media di 12-13, ma quelle con il neandertaliano salgono a 27-28. Ciò indica che la separazione fra i neandertaliani e il ramo che ha condotto agli attuali *Homo sapiens* risale a 317 000-741 000 anni fa, ben prima cioè della loro convivenza in Europa e Medio Oriente. Secondo questa ricerca, i neandertaliani non avrebbero dunque contribuito al nostro patrimonio genetico, o almeno a quello mitocondriale derivato dalla madre.

Il grande limite della ricerca, però, era di essere unica: basare conclusioni così generali sui risultati ottenuti da un solo esemplare è abbastanza rischioso. Ma trovare fossili di neandertaliani in buone condizioni e sacrificabili, almeno in piccola parte, per le analisi, non è cosa di tutti i giorni. Nel marzo 2000, però, la conferma è arrivata. Un gruppo anglo-russo, guidato dal biologo Igor Ovchilnikov, ha pubblicato su «Nature» una ricerca analoga, effettuata su un fossile di neandertaliano di circa 30 000 anni fa trovato nel Caucaso, all'estremo orientale della sua area di diffusione. Il fossile era quello di un bambino le cui ossa erano in eccellente stato di conservazione, tanto che l'mtDNA estratto da una costola è risultato quasi completo e ha richiesto meno amplificazioni, fonte di possibili errori e contaminazioni, di quello analizzato nel 1997.

Anche in questo caso, le analisi sono state effettuate in contemporanea in due laboratori, a Glasgow e a Stoccolma. La lettura di una regione di 345 basi ha mostrato una forte analogia con l'mtDNA del fossile tedesco: solo 12 differenze. Questo indica che i due neandertaliani, pur geograficamente lontani, erano imparentati fra loro almeno come due esseri umani attuali: il loro antenato comune era vissuto intorno a 200 000 anni prima, più o meno come il comune antenato di tutti gli umani attuali rispetto a noi. Tra il campione estratto dal neandertaliano del Caucaso e quello «medio» degli attuali umani, invece, ci sono 22 differenze, il che indica una separazione fra le due specie fra i 365 000 e gli 853 000 anni fa, secondo i calcoli dei biologi russi, in buon accordo con i risultati del 1997. Usando lo stesso metodo il gruppo russo-inglese stima che i moderni *Homo sapiens* siano apparsi fra i 106 000 e i 246 000 anni fa in Africa, per poi migrare in Europa e Medio Oriente dove avrebbero convissuto a lungo, ma senza incrociarsi, con i neandertaliani. Certo, per stabilire con certezza il grado di parentela bisognerà aspettare analisi sul genoma dei *sapiens* arcaici e di quelli che convivevano con i neandertaliani, nonché di altre parti del patrimonio genetico di questi ultimi, ma già queste prime ricerche indipendenti danno un duro colpo alle ipotesi di parentela ravvicinata.

Ma, a differenza dei più antichi reperti provenienti dall'Europa centrale e orientale, che mostrerebbero una combinazione di caratteristiche, il bambino portoghese risale a un tempo in cui si pensava che i neandertaliani non esistessero più. Se i tratti neandertaliani si sono conservati migliaia di anni dopo la scomparsa di quella popolazione, affermano Trinkaus e Duarte, deve esservi stato un consistente mescolamento di gruppi coevi di neandertaliani e umani moderni.

La loro interpretazione non è certo stata accettata unanimemente. In un commento che accompagnava il loro articolo sui «Proceedings of the National Academy of Sciences USA» (giugno 1999), i paleoantropologi Ian Tattersall dell'American Museum of Natural History di New York e Jeffrey H. Schwartz dell'Università di Pittsburgh affermano che Lagar Velho 1 è probabilmente un «tozzo bambino gravettiano». Le massicce proporzioni corporee, che Trinkaus e colleghi vedono come una prova di ascendenza neandertaliana, secondo Stringer potrebbero riflettere l'adattamento al freddo clima del Portogallo di allora. Ma questa interpretazione è problematica: Jean-Jacques Hublin del CNRS francese fa notare che, sebbene alcune popolazioni attuali adattate a climi freddi mostrino analoghe proporzioni corporee, non si conoscono fossili europei dell'epoca con simili caratteristiche. Ciò che non convince Hublin è il fatto che Lagar Velho 1 sia un bambino: «Non sappiamo nulla sulle variazioni nelle proporzioni corporee dei bambini in quell'epoca».

Capacità di sopravvivenza

A parte i problemi tassonomici, molte ricerche si sono concentrate sul comportamento dei neandertaliani, che è stato per lo più frainteso fino a tempi relativamente recenti.

In difesa della cultura neandertaliana

di João Zilhão
e Francesco d'Errico

Fin dalla scoperta del reperto di Neandertal, i ricercatori hanno avuto la tendenza a negare ai neandertaliani le capacità comportamentali degli umani moderni, come l'uso di simboli o di tecniche complesse per la fabbricazione di utensili, per caratterizzarli come esseri subumani, bloccati nelle loro primitive tradizioni tecniche e incapaci di innovazione. E quando testimonianze culturali sofisticate sono state associate a neandertaliani tardi in diversi siti dell'Europa occidentale, si è sempre cercato di trovare spiegazioni alternative. Il più rilevante di questi siti, Grotte du Renne (appartenente a un gruppo di siti collettivamente denominati caverne di Arcy-sur-Cure), nella Francia centrosettentrionale, ha fornito una grande abbondanza di complessi utensili in pietra e osso, ornamenti e oggetti decorati, trovati associati a resti scheletrici neandertaliani. Altri siti in Francia, nei Monti Cantabrici e nei Pirenei hanno fornito oggetti di questo stile, chiamato Castelperroniano.

Dato che i primi europei moderni avevano un'industria confrontabile, quella cosiddetta aurignaziana - che spesso appare negli stessi siti che contengono materiale castelperroniano - alcuni ricercatori hanno proposto che gli strati archeologici siano stati sconvolti, portando alla commistione di manufatti aurignaziani con i livelli risalenti al periodo dei neandertaliani. Altri studiosi, invece, hanno affermato che i neandertaliani acquisirono quegli oggetti tramite contatti con gli umani moderni, o raccogliendo quanto da questi scartato o barattando con loro o semplicemente copiando quanto avevano visto fare dai nuovi arrivati, senza però in realtà capire la sottintesa natura simbolica di alcuni di quei manufatti.

Il nostro riesame delle testimonianze provenienti dalla Grotte du Renne mostra che gli ornamenti personali e gli utensili associati ai neandertaliani non sono stati trovati in strati archeologici rimescolati, come dimostra la presenza di oggetti finiti e degli scarti della loro lavorazione nello stesso livello stratigrafico. Inoltre gli oggetti castelperroniani ritrovati nella Grotte du Renne e in altri siti, come Quinçay, nel Poitou-Charentes, furono realizzati usando tecniche diverse da quelle normalmente impiegate per realizzare gli oggetti aurignaziani. Consideriamo per esempio i ciondoli, fatti per lo più con denti lavorati di orso, cervo, lupo e altri animali: i neandertaliani incidevano una scanalatura intorno alla radice del dente in modo da poterlo appendere con una cordicella legata, mentre la tecnica aurignaziana prevedeva la perforazione del dente. Come ha descritto l'archeologo François Lévêque, perfino quando - raramente - i neandertaliani perforavano un dente, impiegavano una tecnica diretta, senza assottigliarlo prima, come facevano invece gli umani moderni.

Cortesia Dominique Baffier (riquadri a sinistra e a destra), da «Les Derniers Néandertaliens» La Maison Des Roches, 1999; Francesco D'Errico (riquadro al centro)

Ciondoli, utensili d'osso e lame provenienti dal sito della Grotte du Renne sembrano essere opera di neandertaliani. Il fatto che questi oggetti siano stati trovati al di sotto degli strati contenenti resti di esseri umani moderni e che siano stati prodotti con tecniche diverse da quelle usate da questi ultimi fa pensare che alcuni neandertaliani avessero sviluppato indipendentemente una cultura di tipo moderno.

Così pure, le nuove tecniche di scheggiatura della pietra e i tipi di utensili che appaiono in siti neandertaliani tardi di Francia, Italia e Spagna non mostrano alcuna influenza delle tecniche aurignaziane; al contrario, mantengono affinità con le precedenti tradizioni locali, di cui sembrano essere uno sviluppo autonomo.

Se la cultura castelperroniana dei neandertaliani fosse il risultato di contatti con gli esseri umani moderni, allora dovrebbe essere preceduta da quella aurignaziana. Eppure il nostro riesame delle datazioni radiometriche delle sequenze archeologiche rivela che, a parte pochi discutibili casi di sconvolgimento stratigrafico, ovunque le due culture siano rappresentate nello stesso sito, il Castelperroniano giace sempre al di sotto dell'Aurignaziano, rivelandosi quindi più antico. Inoltre, se si considerano le centinaia di datazioni disponibili per l'Europa e il Vicino Oriente, si vede che, ovunque il contesto dei campioni datati sia ben conosciuto, le più antiche occorrenze dell'Aurignaziano non sembrano precedenti a circa 36 500 anni fa. Gli stessi dati radiometrici, tuttavia, indicano che in quel periodo i neandertaliani stavano già muovendosi autonomamente verso la modernità. In altre parole, la cultura castelperroniana e le altre culture neandertaliane tarde, come la uluzziana in Italia, comparvero in Europa 40 000 anni fa, ossia molto prima che gli umani moderni si stabilissero in queste aree.

Il fatto che questo sviluppo autonomo includesse la realizzazione e l'uso di oggetti simbolici creati per essere esibiti sul corpo, come si osserva spesso nelle società tradizionali, riflette l'esistenza di diversi ruoli sociali all'interno delle culture neandertaliane. Quindi, il comportamento «moderno» sembra essersi manifestato in regioni diverse e fra differenti gruppi umani, come del resto avvenne più tardi con l'invenzione dell'agricoltura, della scrittura e delle società stato.

Una spiegazione alternativa, tenendo conto della comparsa pressoché simultanea degli ornamenti personali nel Vecchio Mondo, è che i contatti fra umani moderni e arcaici misero in crisi l'identità biologica, individuale e sociale di entrambi i gruppi, dando origine a un'accentuazione rilevante della produzione di oggetti simbolici. Sulla scorta dei dati disponibili, tuttavia, preferiamo l'ipotesi dell'invenzione indipendente.

Ma qualunque sia l'ipotesi che alla fine si rivelerà corretta, la barriera comportamentale che sembrava separare gli umani moderni dai neandertaliani, e che ci dava l'impressione di essere un gruppo umano unico e particolarmente dotato - cioè l'abilità di produrre una cultura simbolica - è definitivamente crollata.

JOÃO ZILHÃO è direttore dell'Istituto portoghese di archeologia del Ministero della cultura, a Lisbona.
FRANCESCO D'ERRICO è ricercatore del CNRS presso l'Istituto di preistoria e geologia del Quaternario all'Università di Bordeaux, in Francia.

Essi sono stati spesso ritratti come incapaci di cacciare o di pianificare il futuro, ricorda l'archeologo John J. Shea della State University of New York a Stony Brook. «I neandertaliani di certe ricostruzioni non avrebbero potuto sopravvivere un solo inverno, e tanto meno un quarto di milione di anni, nel peggior ambiente in cui esseri umani abbiano mai vissuto» osserva Shea. Analisi dei resti di animali del sito croato di Krapina, invece, indicano che i neandertaliani erano abili cacciatori, capaci di abbattere animali molto grandi come il rinoceronte: è quanto afferma Preston T. Miracle, dell'Università di Cambridge. E gli studi di Shea indicano che alcuni neandertaliani impiegavano perfezionate lance dalla punta di pietra per aver ragione delle prede: un'interpretazione confermata lo scorso anno dalla scoperta, fatta in Siria, dei resti di un asino selvatico con una punta di lancia neandertaliana conficcata nel collo. Inoltre ulteriori ricerche condotte da Shea e dagli archeologi dell'Università dell'Arizona Mary C. Stiner e Steven L. Kuhn hanno dimostrato che le strategie di sussistenza dei neandertaliani variavano ampiamente a seconda del tipo di ambiente e della stagione.

Queste scoperte sono in contrasto con l'idea che i neandertaliani si siano estinti per la loro incapacità di adattarsi; può darsi però che gli umani moderni siano stati ancora più abili di loro. Secondo una teoria molto diffusa, gli esseri umani moderni avevano alcuni vantaggi cognitivi sui neandertaliani, fra cui proprio le più «umane» di tutte le caratteristiche: il pensiero simbolico e il linguaggio. Queste spiegazioni derivavano dall'osservazione che, a partire da 40 000 anni fa, mentre la cultura dei neandertaliani rimaneva relativamente statica, quella degli esseri umani moderni presentava una vasta gamma di innovazioni, molte delle quali simboliche. Sembrava che solo gli umani moderni seppellissero i defunti con modalità complesse, si esprimessero attraverso ornamenti, statuette e pitture parietali e realizzassero elaborati strumenti di osso e corno di cervo: un complesso di attività che corrisponde alla definizione di Paleolitico superiore. I siti neandertaliani, per contro, contenevano solo strumenti di pietra nello stile Musteriano, tipico del Paleolitico medio.

Eppure si erano già rinvenuti indizi secondo cui i neandertaliani erano capaci di pensiero simbolico. Le sepolture neandertaliane, per esempio, sono ben note in tutta Europa e si ritiene che alcune di esse contenessero offerte funebri. (Altri ricercatori sostengono che per i neandertaliani l'interramento dei cadaveri costituisse semplicemente un modo per nascondere il corpo in decomposizione, che avrebbe potuto attirare pericolosi predatori. Quanto alle offerte funebri sepolte con il corpo, potrebbero essere finite casualmente nella fossa.) Prove di attività artistica, in forma di denti forati isolati, pezzi di osso scolpiti e ocra rossa e gialla, sono state riferite per qualche sito, ma data la loro relativa rarità, molti ricercatori tendono a dare spiegazioni alternative per questi oggetti.

La possibilità che i neandertaliani possano aver avuto comportamenti moderni cominciò a essere presa più seriamente in considerazione nel 1980, quando un gruppo di ricercatori riferì la scoperta dei resti di un neandertaliano nel riparo sotto roccia di Saint-Césaire, nella Charente-Maritime (Francia), trovato in associazione con utensili in pietra di un tipo appartenente alla cultura castelperroniana, che si pensava tipica dei soli umani moderni. In seguito, nel 1996, Hublin e colleghi fecero un annuncio che portò definitivamente alla ribalta il Castelperroniano. Scavi iniziati alla fine degli anni quaranta nella Grotte du Renne ad Arcy-sur-Cure, vicino ad Auxerre, in Francia, avevano portato in luce numerose lame, ornamenti e utensili d'osso e resti di capanne e focolari: tutte indicazioni di una cultura del Paleolitico superiore. Dapprima fu impossibile identificare gli scarsi resti umani trovati, ma usando la tomografia computerizzata per esaminare la regione dell'orecchio interno, conservata all'interno di un altrimenti insignificante frammento cranico, il gruppo di Hublin identificò il fossile come neandertaliano.

Diversi scienziati ribatterono che un gruppo di neandertaliani poteva aver ottenuto quegli oggetti o rubandoli o raccogliendoli dopo che esseri umani moderni li avevano gettati o forse barattandoli. Ma questo punto di vista è stato contestato di recente dagli archeologi Francesco d'Errico dell'Università di Bordeaux e João Zilhão dell'Istituto portoghese di archeologia, secondo i quali gli oggetti castelperroniani della Grotte du Renne, pur superficialmente simili a quelli tipici dell'Aurignaziano, riflettono un metodo di realizzazione diverso e più antico.

La maggior parte dei ricercatori è ora convinta che gli oggetti e gli ornamenti castelperroniani siano opera di neandertaliani, ma che cosa abbia provocato questo cambiamento dopo centinaia di migliaia di anni di relativa stasi della loro cultura materiale non è chiaro. «È più semplice vederlo come frutto di imitazione o di acculturazione verso esseri umani moderni piuttosto che assumere che i neandertaliani abbiano inventato da soli quello stile» ragiona l'archeologo di Cambridge Paul A. Mellars. «Sarebbe una coincidenza incredibile se avessero inventato tutti questi oggetti poco prima dell'arrivo degli umani moderni che facevano le stesse cose.» Inoltre Mellars non è d'accordo sull'ordine degli eventi proposto da d'Errico e Zilhão. «Per me gli elementi di datazione provano che i neandertaliani iniziarono a realizzare questi oggetti solo dopo che gli esseri umani moderni erano arrivati in Europa occidentale, o almeno nella Spagna settentrionale.» (Purtroppo, per l'insufficiente precisione con cui si sono potuti datare questi siti, i ricercatori interpretano a volte i dati in modo differente.)

In base alle sue ricerche sugli ornamenti della Grotte du

La sorte dei neandertaliani

di Fred H. Smith

Solide prove si sono accumulate in questi ultimi anni a sostegno del fatto che la comparsa degli esseri umani moderni in Europa sia in gran parte frutto di un'immigrazione di popolazioni provenienti probabilmente dal Vicino Oriente, iniziata fra 40 000 e 30 000 anni fa. Buona parte dei ricercatori ritiene che le prime popolazioni moderne si siano spostate nell'Anatolia e nei Balcani, per poi risalire le pianure e le valli dell'Europa centrale e raggiungere l'Europa settentrionale e occidentale. Nello stesso tempo, si pensava, i neandertaliani indigeni venivano sistematicamente respinti nelle parti più periferiche e inospitali del continente dalle popolazioni moderne in espansione. Sembrava che l'ultimo bastione dei neandertaliani fosse stata la Penisola iberica, da cui provengono i fossili di Zafarraya, che risalgono a 32 000 anni fa, e strumenti attribuiti a neandertaliani addirittura di 28 000 anni fa. Molti studiosi hanno sostenuto che dopo questo periodo non esistano più tracce neandertaliane in Europa e che essi non abbiano fornito alcun contributo biologico alle prime popolazioni di umani moderni. Sembrava insomma che i neandertaliani fossero stati spinti verso la totale estinzione da una specie concorrente: la nostra.

Scoperte recenti effettuate in un importante sito della Croazia nordoccidentale rimettono in discussione alcuni aspetti del quadro comunemente accettato. Grazie a datazioni effettuate mediante spettrometria di massa direttamente su due fossili provenienti dalla grotta di Vindija, i miei colleghi e io abbiamo dimostrato che i neandertaliani vivevano in alcune delle più ambite località europee almeno fino a 28 000 anni fa. Queste datazioni, le più recenti mai ottenute per fossili neandertaliani, dimostrano che questo gruppo umano non fu rapidamente relegato alla periferia, ma riuscì a competere per un lungo periodo con le dilaganti popolazioni moderne.

Questa coesistenza di neandertaliani e prime popolazioni moderne per diversi millenni nel cuore dell'Europa diede luogo a notevoli opportunità di interazione, e Vindija potrebbe documentarne alcune. Lavori dei miei colleghi croati Ivor Karavanić dell'Università di Zagabria e Jakov Radovčić del Museo croato di storia naturale hanno rivelato una combinazione di utensili musteriani e aurignaziani nello stesso livello stratigrafico che conteneva i fossili datati: è chiaro quindi che i neandertaliani avevano realizzato strumenti progrediti oppure li avevano ottenuti tramite scambi con le popolazioni moderne. Morfologicamente, i neandertaliani di Vindija sembrano più moderni della maggioranza dei loro simili, il che fa pensare che i loro antenati si siano incrociati con gli esseri umani moderni.

La possibilità di uno scambio genico fra i due gruppi è anche ribadita dall'osservazione che i neandertaliani hanno lasciato la loro impronta sui primi europei moderni. Fossili di adulti di tipo moderno provenienti da siti dell'Europa centrale, come Vogelherd in Germania sudoccidentale e Mladeč in Moravia (Repubblica ceca), presentano caratteristiche che sono difficili da spiegare, a meno di non considerare contributi neandertaliani alla loro ascendenza. Per esempio, pressoché tutti i neandertaliani e i primi europei moderni mostrano una sporgenza occipitale (la cui esatta forma e posizione differiscono a seconda della forma generale del cranio). Tuttavia i fossili provenienti dai siti di Skhul e Qafzeh, nel Vicino Oriente - che presumibilmente rappresentano gli antenati dei primi europei moderni - non hanno questa caratteristica morfologica. È difficile spiegare come essa possa apparire indipendentemente e ovunque fra i primi europei moderni, mentre è molto più logico pensare che dimostri un legame con i neandertaliani; il fossile di bambino recentemente scoperto in Portogallo permette ulteriori interessanti considerazioni (*si veda la finestra* Il bambino ibrido del Portogallo *a pagina 74*).

A mio parere, la documentazione esistente dimostra che le interazioni comportamentali e biologiche fra i neandertaliani e le prime popolazioni europee moderne furono molto complesse: troppo complesse perché l'origine degli europei moderni abbia comportato una semplice sostituzione dei neandertaliani. Come organismi, questi ultimi non esistono più, e può darsi che i loro geni non siano arrivati fino ai nostri giorni; ma quei geni furono certamente presenti all'inizio della storia biologica moderna dell'Europa.

FRED H. SMITH è preside del Dipartimento di antropologia della Northern Illinois University.

La migrazione in Europa di popolazioni di tipo moderno (*in viola*) non scacciò i neandertaliani, che continuavano ancora a vivere nelle zone centrale e occidentale del continente 28 000 anni fa. Un certo numero di fossili di europei moderni mostra alcune caratteristiche neandertaliane, il che indica che durante il lungo periodo di convivenza le due popolazioni potrebbero essersi incrociate.

Susan Carlson

Renne, l'archeologo della New York University Randall White afferma che questi riflettono metodi di lavorazione noti - sebbene meno comuni - per gli ornamenti aurignaziani. Data la complessa stratigrafia di quel sito, gli oggetti di aspetto moderno potrebbero anche provenire dai soprastanti livelli aurignaziani. Ma ancora più importante, secondo White, è il fatto che il Castelperroniano non esiste al di fuori di Francia, Belgio, Italia e Spagna settentrionale. Se si guarda al Paleolitico superiore da una prospettiva europea, «il Castelperroniano diventa subito post-Aurignaziano».

Ma post-Aurignaziano non significa per forza «dopo il contatto con esseri umani moderni». I più antichi siti aurignaziani non hanno fornito alcun resto umano; si è presunto che appartenessero a umani moderni perché resti sono stati trovati in siti aurignaziani successivi. Ma, sottolinea White, «chi fossero, dal punto di vista biologico, gli aurignaziani di 40 000-35 000 anni fa resta in gran parte un mistero».

Egli aggiunge che se si guarda al Vicino Oriente di circa 90 000 anni fa, gli esseri umani anatomicamente moderni e i neandertaliani realizzavano entrambi utensili in pietra musteriani che, sebbene in apparenza meno elaborati degli strumenti aurignaziani, in realtà richiedevano una considerevole abilità. «Non riesco a immaginare che i neandertaliani producessero questo genere di strumenti tecnologicamente complessi e li tramandassero di generazione in generazione senza possedere il linguaggio» dice White. «Ho visto molte volte riprodurre simili oggetti, e non sono mai riuscito a imitare l'operatore stando solo a guardarlo, senza avere una quantità di spiegazioni verbali.» Perciò White e altri non credono all'affermazione che gli umani moderni fossero cognitivamente superiori ai neandertaliani, specialmente se si intende che questi ultimi erano privi di un loro linguaggio. Sembra invece che gli esseri umani moderni abbiano inventato una cultura maggiormente basata sull'espressione di simboli.

Alcuni ricercatori hanno anche studiato la morfologia cerebrale dei neandertaliani, alla ricerca di indizi sulle loro capacità intellettive. Secondo Ralph L. Holloway della Columbia University, tutte le asimmetrie cerebrali che caratterizzano gli esseri umani moderni esistevano anche nei neandertaliani. «Riuscire a distinguere fra i due - afferma Holloway - è al momento impossibile.» Quanto alle strutture anatomiche che permettono il linguaggio, studi della base di crani fossili condotti da Jeffrey T. Laitman della Mount Sinai School of Medicine indicano che, se i neandertaliani parlavano, dovevano comunque avere un repertorio vocale ridotto. La rilevanza di queste limitazioni fisiche, tuttavia, resta poco chiara.

Un lento declino

Se i neandertaliani possedevano più o meno le stesse abilità cognitive degli umani moderni, la loro scomparsa diviene ancor più enigmatica. Una recente ridatazione dei resti della grotta di Vindija evidenzia comunque che l'estinzione non fu improvvisa. Smith e colleghi hanno dimostrato come i neandertaliani vivessero in Europa centrale ancora 28 000 anni fa, migliaia di anni dopo l'arrivo degli esseri umani moderni. Stringer immagina che gli umani moderni - da lui considerati una specie distinta - sostituirono i neandertaliani in un processo lento e prolungato. «A poco a poco i neandertaliani persero terreno perché gli umani moderni erano un po' più innovativi di loro e un po' più abili ad adattarsi velocemente ai rapidi cambiamenti ambientali, e probabilmente avevano anche gruppi sociali più estesi» suppone Stringer.

D'altro canto, se i neandertaliani erano una variante egualmente capace e abile della nostra specie, come pensano Smith e Wolpoff, la lunga coesistenza con le nuove popolazioni che arrivavano in Europa avrebbe lasciato tempo più che a sufficienza per la mescolanza dei gruppi, da cui la morfologia mista che questi studiosi rilevano nei fossili più tardi di neandertaliani e in quelli più antichi di uomini moderni in Europa. E se le due popolazioni si scambiavano geni, potevano scambiarsi anche idee e cultura, il che potrebbe spiegare alcune delle somiglianze fra, diciamo, Castelperroniano e Aurignaziano. I neandertaliani come gruppo distinto - dice Wolpoff - scomparvero perché sopraffatti dal numero dei nuovi arrivati. Migliaia di anni di incroci fra la piccola popolazione neandertaliana e quella più grande degli umani moderni diluirono i tratti fisici neandertaliani fino a farli scomparire.

«Se potessimo guardare gli australiani fra un migliaio di anni, vedremmo che i tratti europei sarebbero completamente predominanti su quelli degli aborigeni a causa del numero molto maggiore di australiani di origine europea.»

Nella varietà delle opinioni vi è consenso generale almeno su un punto: la vecchia immagine del neandertaliano goffo e privo di cultura è defunta. Se questi antichi ominidi siano fra gli antenati della nostra specie oppure una specie a noi vicina che entrò in competizione con la nostra per il possesso del territorio europeo e fu sconfitta, è ancora tutto da vedere. ❑

Le DIMENSIONI INVISIBILI dell'universo

L'universo potrebbe giacere su una membrana all'interno di uno spazio con un maggior numero di dimensioni; una simile struttura potrebbe unificare le forze e contenere universi paralleli

di Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos e Georgi Dvali

Il classico romanzo del 1884 *Flatlandia: Racconto fantastico a più dimensioni*, di Edwin A. Abbott, descrive le avventure di A. Quadrato, un personaggio che vive in un mondo bidimensionale popolato da figure geometriche animate: triangoli, quadrati, pentagoni e così via. Verso la fine della storia, una creatura sferica da una «Spaziolandia» tridimensionale attraversa Flatlandia e porta A. Quadrato fuori dal suo ambiente planare per mostrargli la vera natura tridimensionale del mondo. Non appena comprende la portata di ciò che la sfera gli sta mostrando, A. Quadrato ipotizza che anche Spaziolandia possa esistere come sottospazio di un più grande universo quadridimensionale.

Sorprendentemente, negli ultimi due anni i fisici hanno iniziato a considerare seriamente un'idea molto simile: ossia che tutto ciò che vediamo nel nostro universo sia confinato in una «membrana» tridimensionale giacente all'interno di un dominio a più dimensioni. Ma, a differenza di A. Quadrato, che deve affidarsi per la sua intuizione all'intervento «soprannaturale» da Spaziolandia, i fisici dovrebbero essere presto in grado di verificare la reale esistenza delle altre dimensioni, che potrebbero estendersi su distanze grandi fino a un millimetro. Si stanno già cercando sperimentalmente gli effetti di queste dimensioni extra sulla gravità; se non ci sono errori teorici, nei futuri esperimenti europei con particelle di altissima energia si potranno osservare processi insoliti che coinvolgono la gravità quantistica, come la creazione di microbuchi neri effimeri. Naturalmente la teoria alla base di tutto questo non ha niente a che fare con la fantasia di uno scrittore: si fonda su alcuni dei più avanzati sviluppi nella teoria delle stringhe e sembra in grado di risolvere alcuni annosi problemi di fisica delle particelle e cosmologia.

I concetti esotici della teoria delle stringhe e delle molte dimensioni derivano dagli sforzi per capire la più familiare delle forze: la gravità. Più di tre secoli dopo la formulazione di Isaac Newton, i fisici ancora non sanno spiegare come mai la gravità sia tanto più debole delle altre forze. Occorre sottolineare che la differenza rispetto alle altre forze è davvero enorme. Un piccolo magnete vince facilmente l'attrazione gravitazionale dell'intera massa della Terra quando solleva un chiodo dal pavimento. L'attrazione gravitazionale fra due elettroni è 10^{43} volte più debole della loro repulsione elettrica. La gravità ci appare importante - poiché ci fa restare con i piedi sul suolo e mantiene la Terra in orbita attorno al Sole - solo perché questi grandi aggregati di materia sono neutri: le forze elettriche risultano incredibilmente piccole e la gravità, pur debole com'è, rimane l'unica forza rilevabile.

L'inspiegabile debolezza della gravità

Gli elettroni dovrebbero avere una massa 10^{22} volte maggiore perché la forza elettrica e quella gravitazionale fra di essi possano equivalersi. Per produrre una particella così massiccia occorrerebbero 10^{19} gigaelettronvolt (GeV) di energia: una quantità nota come energia di Planck. Una grandezza correlata a questa è la lunghezza di Planck, pari a soli 10^{-35} metri. Per avere un'idea, il nucleo di un atomo di idrogeno - il protone - è circa 10^{19} volte più grande e ha una massa di circa 1 GeV. La scala di Planck della lunghezza e dell'energia è ben al di fuori delle capacità dei più potenti acceleratori di particelle. Anche il Large Hadron Collider del CERN potrà sondare distanze solo fino a circa 10^{-19} metri quando inizierà la propria attività, fra circa cinque anni. Poiché la forza di gravità diventa confrontabile con l'elettromagnetismo e le altre forze alla scala di Planck, i fisici hanno generalmente ritenuto che la teoria che unifica tutte le interazioni possa manifestarsi solo a queste energie. La natura della teoria unificata ultima sarebbe quindi ineluttabilmente al di fuori delle possibilità di verifica sperimentale diretta, almeno in un futuro prevedibile.

Gli acceleratori più potenti oggi indagano le energie comprese fra 100 e 1000 GeV (un teraelettronvolt, o TeV). In questo intervallo l'elettromagnetismo e l'interazione debole (una forza tra particelle subatomiche responsabile di certi tipi di decadimento radioattivo) diventano unificati, cioè indistinguibili. Potremmo spiegarci la straordinaria debolezza della gravità solo se comprendessimo perché la scala elettrodebole e quella di Planck siano separate da un fattore 10^{16}.

Il nostro universo potrebbe essere una membrana all'interno di uno spazio con un numero più elevato di dimensioni. Gli esperimenti in corso potrebbero rilevare già quest'anno gli indizi dell'esistenza di dimensioni extra «grandi» fino a un millimetro.

Purtroppo la teoria maggiormente accettata dai fisici delle particelle, il modello standard, non può spiegare l'enormità di questo intervallo, dato che è accuratamente corretta per adattarsi alla scala elettrodebole osservata. Il lato buono è che questo aggiustamento (insieme con diversi altri) permette di spiegare in via definitiva una miriade di osservazioni. Il problema è che la teoria soggiacente dovrebbe essere «sintonizzata» fino a una precisione di una parte su 10^{32}; in caso contrario, le instabilità quantistiche farebbero sì che la scala elettrodebole si estendesse fino alla scala di Planck. La presenza di un simile delicato equilibrio nella teoria è paragonabile a entrare in una stanza e trovare su un tavolo una matita perfettamente in equilibrio sulla punta; pur non impossibile, la situazione è altamente instabile e certo ci chiederemmo come si sia potuta verificare.

Da 20 anni i fisici teorici tentano di risolvere questo dilemma, chiamato «problema gerarchico», modificando la fisica delle particelle intorno ai 10^{-19} metri (o 1 TeV) per stabilizzare la scala elettrodebole. La variante più popolare del modello standard che raggiunge questo scopo implica una nuova simmetria, chiamata supersimmetria. Tornando alla nostra analogia precedente, la supersimmetria agisce come un filo invisibile che sostiene la matita e le impedisce di cadere. Sebbene dagli acceleratori non sia ancora giunta alcuna prova diretta dell'esistenza della supersimmetria, certi elementi indiretti sembrano confermare l'estensione supersimmetrica del modello standard. Per esempio, quando la forza misurata delle interazioni debole, forte ed elettromagnetica viene estrapolata teoricamente a distanze più brevi, esse si riducono con precisione a un valore comune solo se l'estrapolazione è regolata da leggi supersimmetriche. Questo risultato fa supporre che l'unificazione supersimmetrica di queste tre forze si abbia a circa 10^{-32} metri: una distanza circa 1000 volte maggiore della lunghezza di Planck, ma ancora ben al di là delle possibilità degli acceleratori di particelle.

La gravità e le grandi dimensioni spaziali

Per due decenni, quella di alterare la fisica delle particelle in prossimità di 10^{-19} metri è stata l'unica strada percorribile per affrontare il problema gerarchico. Negli ultimi due anni però è stato proposto un approccio radicalmente diverso, che modifica lo spazio-tempo, la gravità e la scala di Planck stessa. L'intuizione chiave è che la straordinaria piccolezza della scala di Planck, accettata per un secolo fin dalla sua introduzione, è basata su un'assunzione mai verificata riguardo al comportamento della gravità a piccole distanze.

La legge gravitazionale newtoniana dell'inverso del quadrato - la forza tra due masse diminuisce con il quadrato della distanza che le separa - funziona estremamente bene su distanze macroscopiche e spiega l'orbita della Terra attorno al Sole, quella della Luna attorno alla Terra e così via. Ma, poiché la gravità è molto debole, la legge è stata verificata solo fino a distanze di un millimetro; dobbiamo estrapolarla su 32 ordini di grandezza per concludere che la gravità diventi intensa solo alla scala di Planck di 10^{-35} metri.

La legge dell'inverso del quadrato è naturale in uno spazio tridimensionale. Consideriamo le linee di forza gravitaziona-

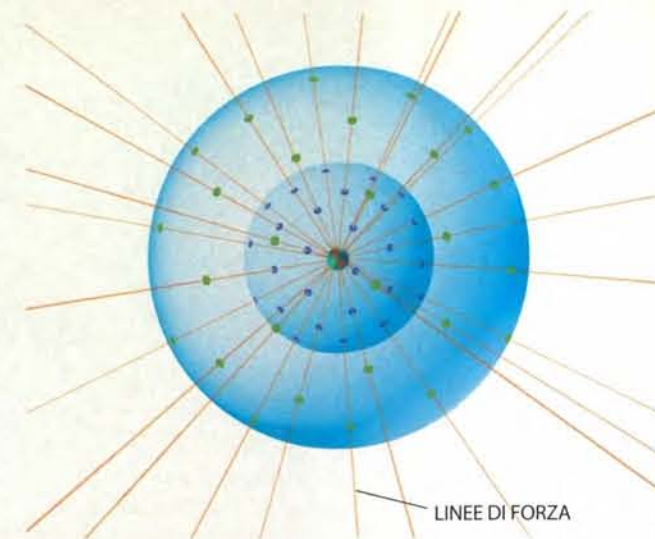
Bryan Christie

le che escono uniformemente dalla Terra; quanto più ci si allontana, tanto più grande è l'area del guscio sferico su cui sono distribuite le linee stesse. L'area della superficie cresce con il quadrato della distanza, sicché la forza viene «diluita» allo stesso modo. Supponiamo che ci sia una dimensione in più, la quale renda quindi lo spazio quadridimensionale. Allora le linee di campo che escono da un punto verrebbero disperse su un guscio quadridimensionale, la cui superficie crescerebbe con il cubo della distanza: la gravità seguirebbe una legge dell'inverso del cubo.

La legge dell'inverso del cubo certamente non descrive il nostro universo, ma immaginiamo ora che la dimensione in più sia arrotolata in un piccolo cerchio di raggio R e che le linee di campo che osserviamo provengano da una minuscola massa puntiforme. Quando le linee di campo sono molto più vicine alla massa della distanza R, possono distribuirsi uniformemente in tutte e quattro le dimensioni, sicché la gravità diminuisce con l'inverso del cubo della distanza. Una volta che le linee si siano disperse completamente attorno al cerchio, tuttavia, rimangono solo tre dimensioni in cui possono continuare a espandersi: per distanze molto maggiori di R la forza varia con l'inverso del quadrato della distanza.

Lo stesso effetto si verifica anche se ci sono molte dimensioni in più, tutte arrotolate su cerchi di raggio R. Per n dimensioni spaziali extra a distanze minori di R, la forza di gravità seguirà una legge dell'inverso della potenza di $2 + n$. Poiché abbiamo misurato la gravità solo fino a un millimetro, non possiamo aver rilevato cambiamenti della gravità causati da dimensioni il cui raggio R sia minore di un millimetro. Inoltre la legge dell'inverso della potenza di $2 + n$ farebbe sì che la gravità raggiungesse la «forza della scala di Planck» ben al di sopra di 10^{-35} metri. Questo significa che la lunghezza di Planck (definita come il punto in cui la gravità diventa forte) non sarebbe tanto piccola, e il problema gerarchico verrebbe ridimensionato.

Si può risolvere completamente il problema gerarchico postulando un numero sufficiente di dimensioni in più, tale da spostare la scala di Planck molto vicina a quella elettrodebole. L'unificazione ultima della gravità con le altre interazioni, o forze, avverrebbe allora vicino a 10^{-19} metri anziché a 10^{-35}, come si ritiene tradizionalmente. Quante dimensioni in più sono necessarie dipende dalla loro grandezza. Viceversa, per un dato numero di dimensioni in più, possiamo calcolare quanto grandi debbano essere per rendere la gravità forte attorno a 10^{-19} metri. Se ci fosse una sola dimensione extra, il suo raggio dovrebbe essere pari circa alla distanza fra la Terra e il Sole. Questo caso è quindi già escluso dalle osservazioni. Due dimensioni in più, tuttavia, possono risolvere il problema gerarchico se la loro grandezza è circa un millimetro: esattamente dove finisce la nostra conoscenza diretta della gravità. Le dimensioni diventano ancora più piccole se ne aggiungiamo altre; a sette dimensioni in più, il loro raggio dovrebbe essere pari a 10^{-14} metri, ossia circa la grandezza di un nucleo di uranio. Questa è una misura molto piccola per gli standard quotidiani, ma molto grande per i criteri della fisica delle particelle.

Postulare dimensioni extra può sembrare bizzarro e artificioso, ma per i fisici è una idea familiare che risale agli anni venti, quando il matematico polacco Theodor Kaluza e il fisico svedese Oskar Klein idearono una notevole teoria della gravità e dell'elettromagnetismo che richiedeva una dimensione in più. L'idea è stata rivitalizzata nelle moderne teorie delle stringhe, che richiedono un totale di 10 dimensioni dello spazio per avere coerenza matematica interna. Nel passato, i fisici hanno sempre assunto che le dimensioni extra fossero arrotolate in minuscoli cerchi di grandezza simile alla tradizionale lunghezza di Planck di 10^{-35} metri: questo le rendeva non rilevabili, ma lasciava in sospeso il problema gerarchico. Al contrario, nella nuova teoria che stiamo discutendo, le dimensioni in più sono arrotolate attorno a grandi cerchi di almeno 10^{-14} metri di raggio, e forse addirittura di un millimetro.

IN POCHE PAROLE

Dimensioni. Il nostro universo sembra avere quattro dimensioni: tre dello spazio (alto-basso, destra-sinistra, avanti-indietro) e una del tempo. Sebbene sia a malapena possibile immaginare ulteriori dimensioni, i matematici e i fisici hanno da lungo tempo analizzato le proprietà di spazi teorici dotati di un numero qualsiasi di dimensioni.

Grandezza delle dimensioni. Le quattro dimensioni conosciute dello spazio-tempo sono immense. La dimensione del tempo si estende nel passato per almeno 13 miliardi di anni e potrebbe estendersi all'infinito nel futuro. Le tre dimensioni spaziali potrebbero essere infinite; i telescopi hanno individuato oggetti distanti più di 12 miliardi di anni luce. Le dimensioni possono però anche essere finite. Per esempio, la superficie bidimensionale della Terra si estende su una circonferenza di circa 40 000 chilometri.

Piccole dimensioni extra. Alcune teorie fisiche moderne postulano l'esistenza di dimensioni aggiuntive della realtà, «arrotolate» in cerchi talmente piccoli (forse con un raggio di 10^{-35} metri) che è impossibile rilevarli. Pensate a un filo di cotone: con una buona approssimazione, è una struttura monodimensionale. Una sola coordinata è sufficiente per specificare in che punto del filo si trova una formica. Ma, al microscopio, possiamo vedere gli acari della polvere muoversi sulla superficie bidimensionale del filo: lungo la grande dimensione della lunghezza e attorno alla piccola dimensione della circonferenza.

Grandi dimensioni extra. Recentemente i fisici hanno compreso che dimensioni in più «grandi», fino a un millimetro, potrebbero esistere pur rimanendo invisibili. Sorprendentemente, nessun dato sperimentale a oggi disponibile contraddice questa ipotesi, che potrebbe spiegare parecchi misteri della fisica delle particelle e della cosmologia. Noi e tutto il contenuto del nostro universo tridimensionale (fatta eccezione per la gravità) saremmo relegati su una «membrana», all'incirca come le palle di biliardo che si muovono sul piano verde bidimensionale del tavolo.

Dimensioni e gravità. Il comportamento della gravità - in particolare la sua scarsa intensità - è intimamente correlato al numero di dimensioni che essa permea. Lo studio dell'azione della gravità su distanze inferiori al millimetro potrebbe quindi rivelare grandi dimensioni extra; esperimenti di questo tipo sono già in corso. Queste dimensioni favorirebbero anche la produzione di bizzarri oggetti della gravità quantistica, come i microbuchi neri, i gravitoni e le superstringhe, che potrebbero venire rivelati entro pochi anni nei nuovi acceleratori di particelle ad alta energia.

GRAHAM P. COLLINS

Le palle su un tavolo da biliardo sono l'analogo delle particelle fondamentali sulla membrana che è il nostro universo. Le collisioni fra le palle irradiano energia in tre dimensioni sotto forma di onde sonore (*in rosso*), analoghe ai gravitoni. Studi precisi del moto delle palle potrebbero rilevare l'energia «mancante», e quindi le dimensioni in più.

Le linee di forza gravitazionali si espandono dalla Terra in tre dimensioni. Via via che cresce la distanza, la forza si «diluisce» perché viene dispersa su un'area superficiale maggiore (*sfere*). L'area di ogni sfera aumenta con il quadrato del suo raggio, sicché la gravità in tre dimensioni diminuisce con l'inverso del quadrato della distanza.

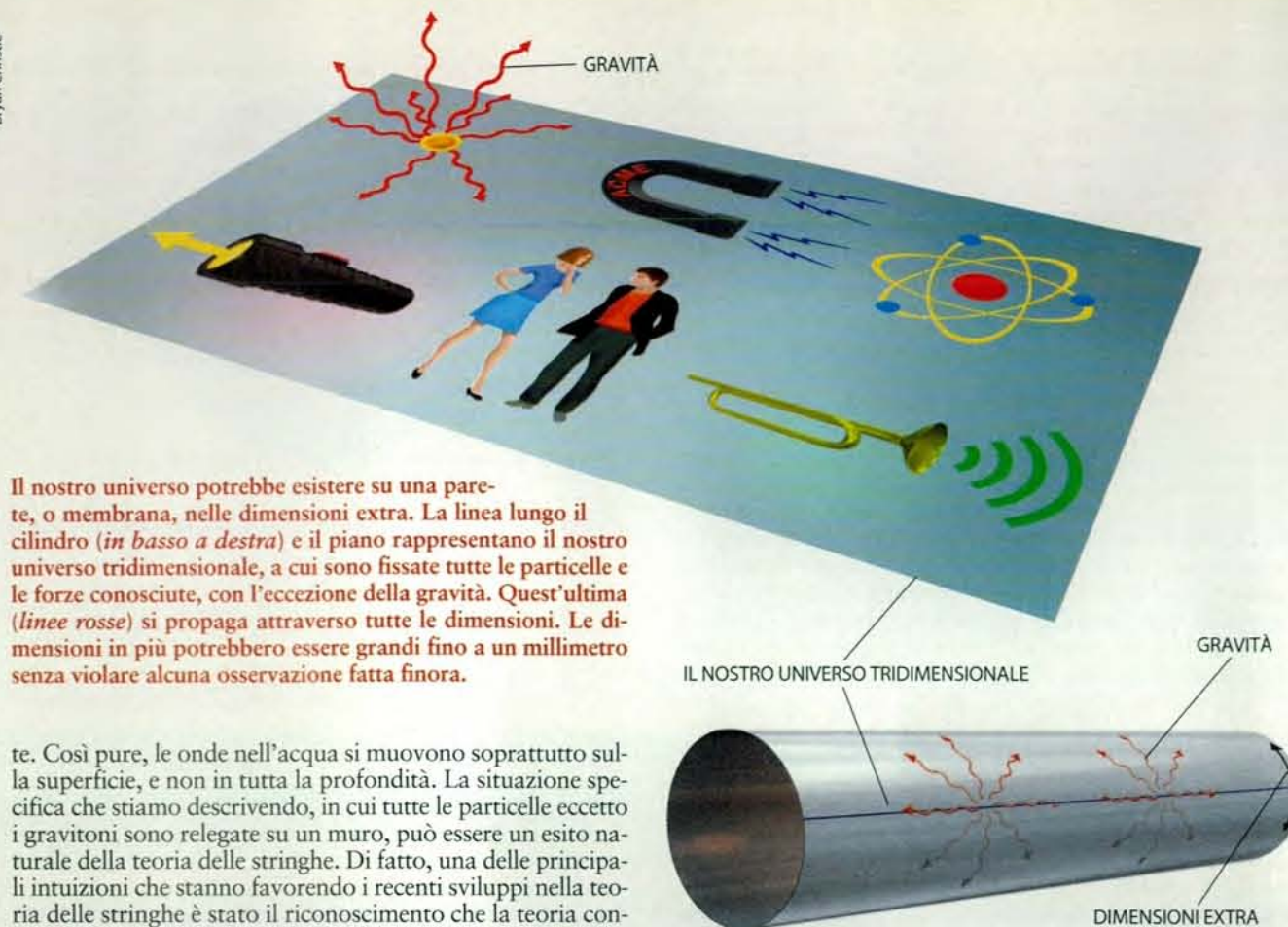
Il nostro universo su una parete

Se queste dimensioni in più sono tanto grandi, perché non le abbiamo ancora viste? Dimensioni extra della grandezza di un millimetro sarebbero visibili a occhio nudo ed evidentissime al microscopio. E sebbene non si sia misurata la gravità per distanze inferiori a circa un millimetro, abbiamo una quantità di conoscenze sperimentali a proposito delle altre interazioni fino a distanze molto più brevi, vicine a 10^{-19} metri; e tutte sono coerenti con uno spazio tridimensionale. Come potrebbero esistere dimensioni extra così grandi?

La risposta è allo stesso tempo semplice e strana: tutta la materia e le forze che conosciamo - con la sola eccezione della gravità - sono appiccicate a una «parete» nello spazio delle dimensioni extra (*si veda l'illustrazione a pagina 84*). Gli elettroni, i protoni, i fotoni e tutte le altre particelle del modello standard non possono entrare nelle dimensioni in più; le linee di forza dei campi magnetici ed elettrici non possono estendersi in uno spazio con più dimensioni. La parete ha solo tre dimensioni e, per quanto riguarda quelle particelle, l'universo potrebbe benissimo essere tridimensionale. Solo le linee del campo gravitazionale possono estendersi in uno spazio a più dimensioni, e solo le particelle che mediano la gravità - i gravitoni - possono percorrere liberamente le dimensioni extra. La presenza delle dimensioni in più può essere percepita solo attraverso la gravità.

Per fare un'analogia, immaginiamo che tutte le particelle del modello standard, come gli elettroni e i protoni, siano palle di biliardo che si muovono su un grande tavolo. Per quanto le riguarda, l'universo è bidimensionale. Cionondimeno, gli «abitanti del tavolo» potrebbero ugualmente percepire il mondo a più dimensioni: quando due palle si scontrano con sufficiente forza, producono onde sonore, che si propagano in tutte e tre le dimensioni portando via un po' di energia dal tavolo da biliardo. Le onde sonore sono l'equivalente dei gravitoni, che possono muoversi nello spazio pluridimensionale. Nelle collisioni fra particelle di alta energia, ci aspettiamo di osservare energia mancante: il risultato della fuga dei gravitoni nelle dimensioni in più.

Sebbene possa sembrare strano che alcune particelle debbano essere confinate su una parete, simili fenomeni sono molto comuni. Per esempio, gli elettroni in un cavo di rame si possono muovere solo lungo lo spazio monodimensionale del filo e non passano nello spazio tridimensionale circostan-

Piccole dimensioni extra arrotolate a formare un cerchio (*circonferenza del tubo*) alterano il modo in cui la gravità (*linee rosse*) si espande nello spazio. A distanze minori del raggio del cerchio (*aree blu*), le linee di forza si disperdono attraverso tutte le dimensioni. A distanze maggiori (*cerchio giallo*) le linee hanno riempito la dimensione extra, e questa non ha più effetto su di esse.

Il nostro universo potrebbe esistere su una parete, o membrana, nelle dimensioni extra. La linea lungo il cilindro (*in basso a destra*) e il piano rappresentano il nostro universo tridimensionale, a cui sono fissate tutte le particelle e le forze conosciute, con l'eccezione della gravità. Quest'ultima (*linee rosse*) si propaga attraverso tutte le dimensioni. Le dimensioni in più potrebbero essere grandi fino a un millimetro senza violare alcuna osservazione fatta finora.

te. Così pure, le onde nell'acqua si muovono soprattutto sulla superficie, e non in tutta la profondità. La situazione specifica che stiamo descrivendo, in cui tutte le particelle eccetto i gravitoni sono relegate su un muro, può essere un esito naturale della teoria delle stringhe. Di fatto, una delle principali intuizioni che stanno favorendo i recenti sviluppi nella teoria delle stringhe è stato il riconoscimento che la teoria contiene «pareti», denominate D-brane (dove -brane viene da membrane, e D sta per Dirichlet, a indicazione di certe proprietà matematiche di questi enti). Le D-brane hanno esattamente le caratteristiche giuste: le particelle come elettroni e fotoni sono rappresentate da minuscoli pezzi di stringa le cui due estremità devono essere appiccicate a una D-brana. I gravitoni sono invece minuscoli anelli di stringa chiusi che possono muoversi in tutte le dimensioni, perché non hanno estremità che li ancorano a una D-brana.

È viva?

Una delle prime cose che i teorici fanno quando hanno una nuova teoria è cercare di ucciderla trovando un'incongruenza con un risultato sperimentale noto. La teoria delle grandi dimensioni in più altera la gravità a distanze macroscopiche e modifica altre leggi fisiche delle alte energie, e quindi deve essere facile da uccidere. Tuttavia, nonostante si distacchi radicalmente dalla nostra usuale immagine dell'universo, questa teoria non contraddice alcun risultato sperimentale noto. Alcuni esempi del tipo di test che essa supera mostrano quanto questa conclusione sia sorprendente.

Ci potremmo per prima cosa preoccupare che il cambiamento della gravità influenzi gli oggetti tenuti insieme da questa forza, come le stelle e le galassie; in realtà non è così. La gravità cambia solo a distanze inferiori al millimetro; ma in una stella, per esempio, questa forza agisce su distanze di migliaia di chilometri per mantenere unite parti lontane dell'oggetto. In generale, anche se le dimensioni in più rafforzano molto più rapidamente la gravità a brevi distanze, essa continua a raggiungere le altre forze solo a 10^{-19} metri, e a distanze maggiori rimane molto debole in confronto a esse.

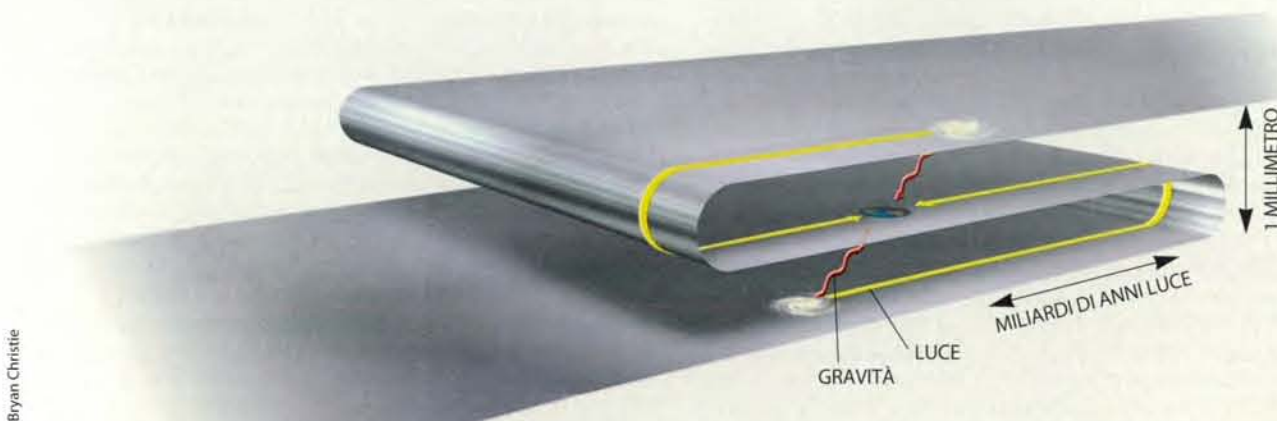
Una preoccupazione più grave riguarda i gravitoni, ossia le ipotetiche particelle che trasmettono la gravità in una teoria quantistica. Nella teoria con le dimensioni in più, i gravitoni interagiscono molto più fortemente con la materia (il che equivale a una gravità che diventa più intensa a brevi distanze), sicché nelle collisioni di particelle di alta energia dovrebbe essere prodotto un numero maggiore di essi. Inoltre essi si propagano in tutte le dimensioni, asportando così energia dalla «parete», che è l'universo dove noi viviamo.

Quando una stella collassa ed esplode poi come una supernova, l'elevata temperatura può facilmente far passare gravitoni nelle dimensioni in più (*si veda l'illustrazione in alto a pagina 86*). Dalle osservazioni della famosa supernova 1987A, tuttavia, sappiamo che un'esplosione di supernova emette la maggior parte della propria energia sotto forma di neutrini, lasciando poca possibilità di una perdita di energia dovuta ai gravitoni. La nostra conoscenza delle supernove limita quindi la possibile intensità delle interazioni fra gravitoni e materia. Sembra che questo limite possa uccidere l'idea delle grandi dimensioni in più, ma calcoli dettagliati mostrano che la teoria sopravvive. Il limite più restrittivo si ha per sole due dimensioni in più, nel qual caso i gravitoni raffreddano troppo la supernova se la scala di Planck viene ridotta al di sotto di 50 TeV circa. Se le dimensioni in più sono almeno tre, questa scala può arrivare anche solo a pochi TeV senza far sì che le supernove si indeboliscano troppo.

I teorici hanno analizzato molti altri possibili vincoli basati su cambiamenti inaccettabili in sistemi che vanno dalla teoria del big bang dell'universo primordiale fino alle collisioni di raggi cosmici a energie ultraelevate. La teoria supera tutte queste verifiche sperimentali, che di fatto si dimostrano meno stringenti del limite associato alle supernove. Può sorprendere il fatto che i limiti diventano meno restrittivi via via che alla teoria vengono aggiunte ulteriori dimensioni. Lo abbiamo visto fin dall'inizio: il caso di una dimensione in più è stato escluso immediatamente perché la gravità sarebbe stata alterata a distanze paragonabili alle dimensioni del sistema solare. È per questo motivo che molte dimensioni in più hanno un effetto meno drastico: il rafforzamento della gravità inizia a distanze più brevi e quindi ha un impatto inferiore sui processi a grande distanza.

La risposta entro il 2010

La teoria risolve il problema gerarchico rendendo la gravità una forza forte a energie dell'ordine dei TeV: esattamente la scala di energia che verrà indagata con gli acceleratori di particelle che stanno per entrare in funzione. Gli esperimenti presso il Large Hadron Collider, che inizieranno attorno al 2005, dovrebbero quindi rivelare la natura della gravità quantistica. Per esempio, se la teoria delle stringhe fosse la descrizione corretta della gravità quantistica, le particelle dovrebbero essere minuscoli anelli di stringa, che possono vibrare come una corda di violino. Le particelle fondamentali note corrispondono a una stringa che non sta vibrando, proprio come una corda di violino non percossa dall'archetto. Ogni differente «nota musicale» che una stringa può produrre vibrando apparirebbe come una diversa nuova particella esotica. Nelle teorie convenzionali le stringhe sono ritenute di grandezza intorno ai 10^{-35} metri, sicché le nuove particelle avrebbero una massa dell'ordine dell'energia di Planck tradizionale: la «musica» di simili stringhe avrebbe una tonalità troppo alta perché la si possa ascoltare con gli acceleratori di particelle. Ma se esistessero grandi dimensioni in più, le stringhe diventerebbero molto più lunghe - circa 10^{-19} metri - e le nuove particelle apparirebbero a energie dell'ordine dei TeV, ossia abbastanza basse da essere «udite» dall'LHC.

Analogamente, le energie necessarie per creare microbuchi neri nelle collisioni fra particelle ricadrebbero nell'intervallo sperimentale (*si veda l'illustrazione in basso a pagina 86*). Del diametro di circa 10^{-19} metri, essi sarebbero troppo piccoli per causare problemi: emetterebbero la cosiddetta «radiazione di Hawking», evaporando in meno di 10^{-27} secondi. Osservando tali fenomeni, i fisici potrebbero indagare direttamente i misteri della fisica dei buchi neri quantistici.

Anche a energie troppo basse per produrre stringhe in vibrazione o buchi neri, le collisioni fra particelle daranno origine a un gran numero di gravitoni: un processo trascurabile nelle teorie convenzionali. Gli esperimenti potrebbero non rilevare direttamente i gravitoni emessi, ma l'energia che essi trasportano apparirebbe come energia mancante dai resti di collisione. La teoria prevede specifiche proprietà per l'energia mancante - come dovrebbe variare con l'energia della collisione e così via - sicché la prova della produzione di gravitoni può essere distinta da altri processi in grado di sottrarre energia in particelle non rilevate. I dati attuali ricavati dagli acceleratori di più alta energia stanno già ponendo qualche vincolo allo scenario delle grandi dimensioni in più. Gli esperimenti con l'LHC dovrebbero provare l'esistenza dei gravitoni o iniziare a confutare la teoria per la loro assenza.

La teoria potrebbe però essere comprovata anche da esperimenti completamente diversi, e forse senza dover aspettare che i nuovi acceleratori di particelle entrino in funzione. Ricordiamo che, perché due dimensioni in più possano risolvere il problema gerarchico, devono essere grandi fino a un millimetro. Le misure di gravità dovrebbero quindi rivelare uno spostamento dalla legge dell'inverso del quadrato di Newton a una legge dell'inverso della quarta potenza a distanze intorno a un millimetro. Le estensioni della struttura di base della teoria portano anche ad altre possibili deviazioni dalla gravità newtoniana, la più interessante delle quali prevede l'insorgere di forze repulsive un milione di volte più intense della gravità tra masse separate di meno di un millimetro. Esperimenti con rivelatori sensibilissimi sono già in fase di realizzazione, allo scopo di verificare la legge di Newton dall'intervallo dei centimetri fino a quello delle decine di micrometri (*si veda l'illustrazione a pagina 88*).

Per verificare le forze gravitazionali a distanze submillimetriche si devono usare oggetti non molto più grandi di un millimetro, e quindi di massa molto piccola. Si devono poi schermare accuratamente numerosi effetti, come le forze elettrostatiche residue, che potrebbero mascherare o falsare la minuscola attrazione gravitazionale. Simili esperimenti sono delicati e difficili, ma è entusiasmante pensare che essi potrebbero rivelare nuovi fenomeni fisici. Anche indipendentemente dalla ricerca di dimensioni extra, è importante estendere la nostra conoscenza diretta della gravità a queste brevi distanze. Tre ricercatori stanno attualmente conducendo esperimenti di questo tipo: John C. Price dell'Università del

Universi paralleli invisibili potrebbero esistere allineati con il nostro, sulle loro membrane a meno di un millimetro di distanza dalla nostra. Simili universi paralleli potrebbero anche essere parti diverse del nostro stesso universo ripiegato su se stesso. La cosiddetta materia oscura potrebbe essere costituita da stelle e galassie ordinarie sui «fogli» adiacenti: la loro gravità (*in rosso*) può raggiungerci prendendo la scorciatoia attraverso le dimensioni extra, ma noi non possiamo vederle perché la luce (*in giallo*) deve propagarsi per miliardi di anni fino alla piega e poi tornare indietro.

Colorado, Aharon Kapitulnik della Stanford University ed Eric G. Adelberger dell'Università di Washington; risultati preliminari sono attesi entro l'anno.

L'idea delle dimensioni in più prosegue in effetti la tradizione copernicana nel comprendere il nostro posto nel mondo: la Terra non è nel centro del sistema solare, il Sole non è nel centro della nostra galassia, la nostra galassia è solo una fra i miliardi che popolano un universo privo di un centro e ora il nostro intero universo tridimensionale potrebbe essere solo una membrana sottile all'interno dello spazio delle dimensioni. Se consideriamo di eseguire sezioni attraverso le dimensioni extra, il nostro universo occuperebbe un punto infinitesimale in ciascuna sezione, circondato da un vuoto.

Ma forse possiamo spingerci oltre. Così come la Via Lattea non è l'unica galassia nell'universo, potrebbe il nostro universo non essere l'unico nello spazio pluridimensionale? Le membrane di altri universi tridimensionali potrebbero essere parallele alla nostra, lontane da noi appena di un millimetro, ma nelle dimensioni extra. Allo stesso modo, sebbene tutte le particelle del modello standard debbano essere fissate al nostro universo membrana, altre particelle al di fuori del modello standard, oltre ai gravitoni, potrebbero propagarsi nelle altre dimensioni. Ben lungi dall'essere vuote, le dimensioni in più potrebbero avere una moltitudine di strutture interessanti.

Gli effetti delle nuove particelle e degli universi nelle dimensioni extra potrebbero fornire una risposta a molti misteri irrisolti della fisica delle particelle e della cosmologia. Per esempio, potrebbero spiegare la massa delle sfuggenti particelle chiamate neutrini. Importanti dati ottenuti dall'esperimento giapponese Super Kamiokande indicano che i neutrini, a lungo considerati privi di massa, hanno in realtà una massa minuscola ma non nulla. Il neutrino può ottenere la propria massa interagendo con un campo «compagno» situato nelle dimensioni extra. Come avviene per la gravità, l'interazione è fortemente diminuita dal fatto che il compagno è disperso nelle dimensioni extra, e così il neutrino acquista solo una massa minuscola.

Universi paralleli

Un altro esempio è il mistero cosmologico di quale sia il costituente della «materia oscura», la sostanza invisibile che sembra costituire il 90 per cento della massa dell'universo. La materia oscura potrebbe risiedere in universi paralleli; essa influenzerebbe il nostro universo mediante la gravità e sarebbe necessariamente «oscura», in quanto i fotoni sono legati alla membrana: non possono varcare il vuoto che ci separa da questa materia parallela per raggiungerci.

Questi universi paralleli non assomiglierebbero al nostro, avendo forze e particelle differenti e magari essendo confinati in una membrana con un numero inferiore o superiore di dimensioni. Una possibilità interessante, tuttavia, è che abbiano le stesse identiche proprietà del nostro mondo. Immaginate che la parete dove viviamo sia ripiegata su se stessa un certo numero di volte nelle dimensioni extra (*si veda l'illustrazione alla pagina precedente*). Gli oggetti sull'altro lato di una piega apparirebbero molto distanti, pur essendo a meno di un millimetro da noi nelle dimensioni extra: la luce che essi emettono deve però arrivare fino alla piega e tornare indietro prima di raggiungerci. Se la piega si trova a miliardi di anni luce di distanza, non c'è ancora stato il tempo, dall'inizio dell'universo, perché la luce proveniente dall'altro lato ci raggiungesse.

La materia oscura potrebbe essere costituita da materia ordinaria, forse anche da normali stelle e galassie, che splendono luminose sulle loro pieghe. Esse produrrebbero effetti osservativi interessanti, come onde gravitazionali emesse da supernove o da altri processi astrofisici violenti. I rivelatori di onde gravitazionali che saranno completati nei prossimi anni potrebbero provare l'esistenza di pieghe osservando grandi sorgenti di radiazione gravitazionale non spiegabili con la materia visibile nel nostro stesso universo.

La teoria che abbiamo presentato qui non è stata la prima proposta a includere dimensioni extra più grandi di 10^{-35} metri. Nel 1990 Ignatios Antoniadis dell'École Polytechnique francese suggerì che alcune delle dimensioni della teoria delle stringhe potrebbero essere grandi fino a 10^{-19} metri, ma mantenne la scala della gravità quantistica intorno a 10^{-35} metri. Nel 1996 Petr Hořava del California Institute of Technology ed Edward Witten dell'Institute for Advanced Study di Princeton fecero notare che una singola dimensione extra di 10^{-30} metri unificherebbe la gravità insieme con l'unificazione supersimmetrica delle altre forze, tutte a 10^{-32} metri. Seguendo questa idea, Joseph Lykken del Fermi National Accelerator Laboratory di Batavia, nell'Illinois, tentò di ridurre la scala dell'unificazione fino a 10^{-19} metri (senza ricorrere a grandi dimensioni in più). Keith Dienes dell'Università dell'Arizona ed Emilian Dudas e Tony Gherghetta del CERN osservarono nel 1998 che dimensioni extra più

Una supernova si verifica quando il collasso di una stella massiccia produce un'onda d'urto esplosiva. La maggior parte dell'energia viene emessa sotto forma di neutrini (*in blu*). Se esistono dimensioni in più, i gravitoni generati (*in rosso*) sottraggono più energia di quanto non farebbero in tre dimensioni. Si possono porre limiti alle proprietà delle dimensioni in più imponendo che la perdita di energia dovuta ai gravitoni non sia tale da far sì che le supernove si indeboliscano troppo.

Microbuchi neri potrebbero essere creati in acceleratori di particelle come il Large Hadron Collider, facendo collidere particelle come i protoni di alta energia (*in giallo*). I buchi neri evaporerebbero rapidamente emettendo la cosiddetta radiazione di Hawking, costituita da particelle del modello standard (*in blu*) e gravitoni (*in rosso*).

L'oscillatore torsionale installato all'Università del Colorado serve per ricercare cambiamenti nella gravità tra 0,05 e 1 millimetro. Cristalli piezoelettrici fanno vibrare come un trampolino la massa sorgente di tungsteno (*in blu*). Qualsiasi forza che agisca tra la massa sorgente e il rivelatore di tungsteno (*in rosso*) produce nel rivelatore oscillazioni di torsione (*nel particolare, le oscillazioni sono esagerate*), che vengono rilevate dagli strumenti. Uno scudo placcato in oro sopprime le forze elettrostatiche e la sospensione mediante pile di elementi isolanti di ottone impedisce alle vibrazioni di andare dalla sorgente al rivelatore. Gli schermi elettrostatici che racchiudono l'apparecchio non sono mostrati. I primi risultati a temperatura ambiente (300 kelvin) sono attesi per quest'anno ma, per avere la massima sensibilità, lo strumento dovrà essere raffreddato a 4 kelvin con elio liquido.

piccole di 10^{-19} metri potrebbero consentire alle forze di unificarsi a distanze molto più grandi di 10^{-32} metri.

Dopo la nostra proposta del 1998 sono state formulate variazioni interessanti, che utilizzano sempre come ingredienti di base le dimensioni extra e l'«universo a parete». Un modello notevole è quello proposto da Lisa Randall di Princeton e Raman Sundrum di Stanford, secondo cui la gravità stessa potrebbe essere concentrata su una membrana in uno spazio-tempo a cinque dimensioni che è infinito in ogni direzione. La gravità appare quindi naturalmente molto debole nel nostro universo, in quanto ci troviamo su una membrana diversa.

Per 20 anni si è convenzionalmente cercato di risolvere il problema gerarchico, e quindi di comprendere perché la gravità sia così debole, assumendo che la scala di Planck di 10^{-35} metri fosse fondamentale e che la fisica delle particelle debba cambiare a 10^{-19} metri. La gravità quantistica rimarrebbe così nel regno della speculazione teorica, definitivamente al di fuori delle possibilità sperimentali. Negli ultimi due anni ci siamo resi conto che questo non è per forza vero. Se ci sono dimensioni extra grandi, nei prossimi anni potremmo scoprire deviazioni dalla legge di Newton vicino, per esempio, a 6×10^{-5} metri e rivelare vibrazioni di stringhe o buchi neri con l'LHC. La gravità quantistica e la teoria delle stringhe diventerebbero ipotesi scientifiche verificabili. In ogni caso, gli esperimenti indicheranno il modo per rispondere alle profonde questioni lasciate aperte fin dal tempo di Newton, ed entro il 2010 avremo fatto decisivi progressi nel comprendere la strana debolezza della gravità. E forse scopriremo che viviamo in una esotica Flatlandia, un universo-membrana dove la gravità quantistica è appena dietro l'angolo.

NIMA ARKANI-HAMED, SAVAS DIMOPOULOS e GEORGI DVALI hanno sviluppato la teoria delle dimensioni extra nel febbraio 1998, alla Stanford University. Arkani-Hamed si è laureato in fisica nel 1997 all'Università della California a Berkeley, dove è stato nominato assistente nel 1999. Dimopoulos, originario di Atene, si è laureato all'Università di Chicago e insegna fisica a Stanford dal 1979. Nel 1981, con Howard Georgi di Harvard, propose il modello standard supersimmetrico. Dvali è nato nell'attuale Georgia; nel 1992 si è laureato in fisica delle alte energie e cosmologia all'Università di Tbilisi. Nel 1998 è diventato professore associato alla New York University. I tre condividono uno speciale interesse per ciò che si trova al di là del modello standard della fisica delle particelle.

ABBOTT EDWIN A., *Flatlandia: Racconto fantastico a più dimensioni*, Adelphi, Milano, 1995.

DUFF MICHAEL, *La teoria un tempo chiamata «delle corde»* in «Le Scienze» n. 358, giugno 1998.

GREENE BRIAN, *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*, W. W. Norton, 1999.

Un'introduzione a facili esperimenti sulla gravità si può consultare all'indirizzo: http://mist.npl.washington.edu/eotwash/

Informazioni introduttive sulla teoria delle stringhe sono disponibili nel sito: http://superstringtheory.com/

Il risveglio dei vulcani esplosivi

Un nuovo modello fisico permette di comprendere l'evoluzione temporale delle grandi eruzioni esplosive e di prevedere le fasi più violente della loro attività

di Roberto Scandone e Lisetta Giacomelli

18 maggio 1980: il St. Helens, uno dei più importanti vulcani della Catena delle Cascate, che si estende lungo il Pacifico dalla California alla British Columbia, dopo oltre un secolo di riposo, inizia una serie di disastrose eruzioni esplosive che si protrarrà fino al mese di ottobre.

Gary Braasch/CORBIS

Le grandi eruzioni esplosive emettono in poche ore volumi di magma spesso superiori al chilometro cubo. Il magma risale nel condotto come una schiuma di gas e liquido, fino a un punto critico di pressione dove le bolle di gas cominciano a esplodere. I brandelli di magma raggiungono la bocca del cratere accelerati dai gas ed escono formando una colonna eruttiva alta decine di chilometri (colonna pliniana), dalla quale ricadono solidi sotto forma di pomici e ceneri che ricoprono aree di migliaia di chilometri quadrati.

Ogni vulcano ha la sua personalità

Spiegare il comportamento dei vulcani attraverso un modello non è semplice, in quanto bisogna individuare regole generali di comportamento, distinguendole dai fattori casuali. Inoltre, non si possono programmare esperimenti per verificare i modelli delle eruzioni esplosive perché esse avvengono spesso in vulcani quiescenti da lungo tempo, dove quindi manca una rete di sorveglianza adeguata.

Una metodologia per conoscere un vulcano consiste nello studio dei prodotti emessi nel corso delle passate eruzioni. In questi ultimi anni, il paziente lavoro di raccolta di dati svolto dai vulcanologi in ogni parte del mondo ha incominciato a dare i suoi frutti e si intravvedono alcune ricorrenze nel comportamento dei vulcani che permettono la formulazione di modelli fisici attendibili.

Foto: Lisetta Giacomelli

La fotografia mostra una successione di prodotti di un'eruzione esplosiva del Vesuvio avvenuta 3800 anni fa. Essa corrisponde a quella proposta nel 1985 dal vulcanologo inglese George Walker. Dal basso verso l'alto: pomici da caduta, alternanza di pomici e ceneri, depositi dei flussi piroclastici.

Una ricorrenza davvero importante nelle eruzioni esplosive è stata per la prima volta intuita nel 1985 dal vulcanologo inglese George Walker, che era riuscito a ricostruire una successione tipica dei prodotti vulcanici. Questa sequenza contiene, dal basso verso l'alto, pomici cadute da una colonna eruttiva pliniana; strati di pomici alternati a strati di cenere derivanti da una fase a impulsi; brecce che testimoniano un allargamento del condotto eruttivo e poi grossi spessori di materiale eterogeneo, sedimentato da flussi che si originano per un incremento nel tasso di emissione del magma. I flussi piroclastici si formano quando il tasso di emissione diventa talmente elevato che la miscela eruttiva non riesce a risalire per convezione nell'atmosfera. Il materiale esce dal cratere formando una vera e propria fontana di pomici, pezzi di roccia, cenere e gas che, tutt'insieme, scivola lungo i fianchi del vulcano.

L'evoluzione della dinamica eruttiva, letta nella successione dei prodotti, indica che l'eruzione cambia invariabilmente con il decisivo aumento del tasso di emissione di magma. Questa è la prima regolarità che utilizziamo nella formulazione del nostro modello.

L'analisi chimica dei prodotti di molte eruzioni mostra che il magma, prima di giungere in superficie, ha subito un lento processo di raffreddamento che ha provocato la formazione di fasi minerali stabili in condizioni di pressione corrispondenti a profondità dell'ordine di 5-10 chilometri. Nel corso di questo processo, il liquido si è arricchito in gas quali vapor acqueo, anidride carbonica e biossido di zolfo giungendo a condizioni prossime alla saturazione. Ogni ulteriore variazione, come altro gas o una diminuzione di pressione, provoca l'essoluzione della fase gassosa e la formazione di bollicine all'interno del magma. Questo processo è testimoniato dalle inclusioni fluide che si possono osservare nei cristalli che si sono formati all'interno del serbatoio magmatico. Nei prodotti di molte eruzioni esplosive sono frequenti le inclusioni di acqua, che indicano come il magma fosse saturo di questo composto già prima della sua risalita in superficie.

Quindi, il secondo elemento ricorrente che teniamo in considerazione è che le eruzioni esplosive avvengono quando la camera magmatica contiene un materiale fuso saturo d'acqua.

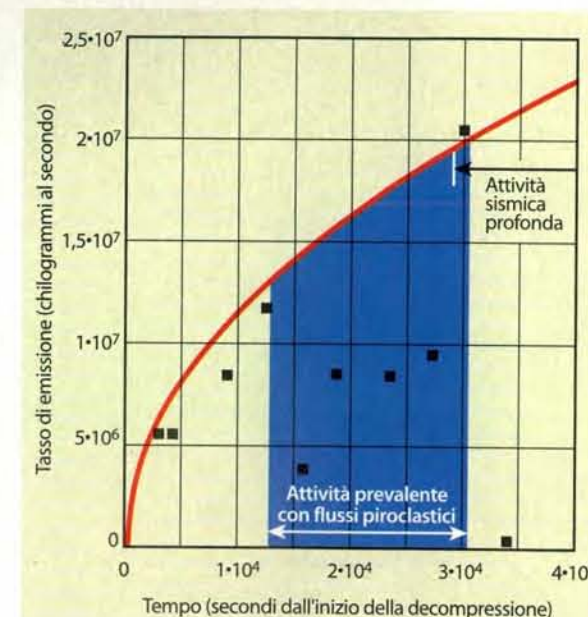
L'analisi della sismicità osservata durante le ultime maggiori eruzioni esplosive, come quelle del St. Helens nel 1980 e del Pinatubo nel 1991, ha rivelato un'evoluzione del tutto particolare. La fase di risveglio del vulcano che precede l'attività vera e propria è caratterizzata da una serie di piccoli terremoti, con magnitudo in genere non superiore a 4-4,5. La loro profondità risulta compresa fra 5-7 chilometri e la superficie. L'incremento dell'attività vulcanica con piccole esplosioni o estrusione di duomi è accompagnato da terremoti le cui onde hanno un periodo più lungo (0,5-1 secondi). Con il progredire dell'eruzione, sotto il vulcano si verifica un numero crescente di terremoti a profondità maggiori di 6-7 chilometri che si dispongono in maniera tale da delimitare un volume nel quale non avvengono terremoti, interpretato come il serbatoio magmatico. Questa sismicità indica l'incipiente implosione del serbatoio, decompresso dall'emissione di magma e infatti fa seguito al momento di massimo tasso di emissione di materiale, con la formazione dei flussi piroclastici.

Il terzo elemento ricorrente è, dunque, l'evoluzione nel tempo della sismicità che accompagna le eruzioni esplosive.

Disegno: Andrea Ambrogio

Lo schema in alto mostra le tre fasi di un'eruzione esplosiva secondo un recente modello. Nella fase 1 il serbatoio magmatico si apre e si formano le prime bolle al suo interno. Nella fase 2 le bolle crescono e si forma una colonna sostenuta. Nella fase 3 si ha l'emissione dei flussi piroclastici e il collasso della camera magmatica. Il grafico a fianco mostra l'andamento del tasso di emissione durante l'eruzione del St. Helens. Le stime sono calcolate in base all'altezza della colonna eruttiva. L'area in blu indica la fase dei flussi piroclastici durante la quale la colonna eruttiva si abbassa.

Un nuovo modello fisico

Per spiegare queste ricorrenze è necessario ipotizzare che le pareti del serbatoio magmatico abbiano un comportamento viscoelastico, con tempi di risposta alle rapide sollecitazioni di pressione più lunghi della durata dell'eruzione e che durante questo processo si comportino come un vero e proprio contenitore rigido.

Nel nostro modello, il magma saturo occupa l'interno di un serbatoio che si è andato sigillando nel corso del tempo per la deposizione di minerali intorno alle pareti. Questo sigillo può rompersi con una prima fuoriuscita di gas e di piccole frazioni di magma. Di conseguenza, il serbatoio subisce un'iniziale decompressione, sufficiente a provocare l'essoluzione del gas dal magma saturo e la formazione di bolle.

L'aumento di volume del magma, provocato dalla crescita delle bolle, innesca una nuova fuoriuscita di magma e una nuova decompressione, con un processo di reazione positiva che rapidamente accelera nel tempo. La prima fase è caratterizzata dalla formazione della colonna eruttiva sostenuta dalla quale precipitano le pomici. Il continuo aumento del tasso di emissione provoca la destabilizzazione della colonna pliniana, fino alla formazione dei flussi piroclastici. Durante questa fase, la decompressione interna diventa così elevata che le pareti collassano generando terremoti profondi.

Quindi, le condizioni perché avvenga un'eruzione esplosiva sono la rigidità delle pareti del serbatoio e la rapida decompressione iniziale.

Siamo riusciti a formulare stime quantitative sulla variazione di volume della massa magmatica, utilizzando i dati sperimentali sulla crescita delle bolle raccolti da un gruppo di ricercatori israeliani diretto da Oded Navon. A partire da queste stime, abbiamo verificato che la dinamica dell'eruzione è controllata dalla velocità con cui crescono le bolle. L'aumento del tasso di emissione nel corso del tempo è legato all'accelerazione impressa alla crescita delle bolle dalla progressiva decompressione magmatica. Il modello lega la durata dell'eruzione al numero di bolle che si formano nel magma. A sua volta, la quantità dei nuclei di formazione delle bolle è influenzata dalla presenza di minerali contenenti ferro e magnesio. Quindi, la composizione mineralogica del magma può controllare la velocità di una eruzione.

La quantità di magma emesso dipende da due fattori principali: il volume di liquido saturo in acqua contenuto nel serbatoio e la resistenza delle pareti. Quanto maggiori sono queste due quantità, tanto più magma arriverà in superficie. Un importante risultato che si ottiene con questo modello è la stima del volume della camera magmatica a partire dal volume dei prodotti eruttati. I valori ottenuti concordano con un margine di errore del 10-20

per cento - accettabile per questo tipo di problema - con quelli calcolati sulla base dei dati sismici, sia per l'eruzione del St. Helens sia per quella del Pinatubo.

Un'altra verifica deriva dalla coincidenza dei dati sperimentali di eruzioni note e di quelli teorici che spiegano, in base alle proprietà fisiche del magma, la durata dell'eruzione e la variazione del tasso di emissione, nonché l'altezza della colonna eruttiva.

18 maggio 1980: erutta il St. Helens

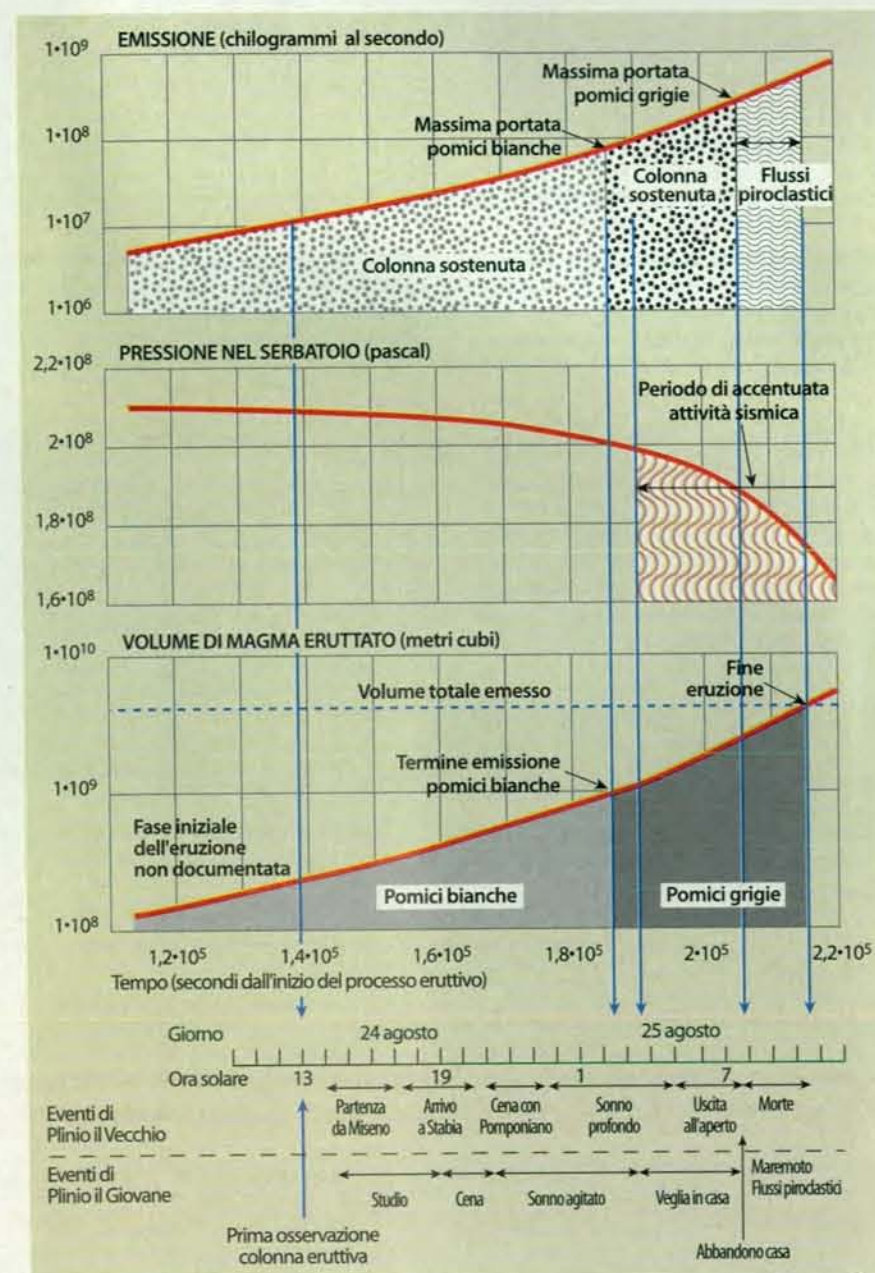
L'eruzione di questo vulcano, avvenuta venti anni fa, è uno di quegli eventi che segna un'intera generazione di vulcanologi, non tanto per la sua particolarità o dimensione, quanto per la quantità e qualità dei dati raccolti.

Il vulcano si risvegliò il 20 marzo del 1980 con uno sciame sismico localizzato pochi chilometri sotto l'apparato. Il 27 marzo avvenne la prima esplosione freatica. Questa attività proseguì per il seguente mese di aprile e l'inizio di maggio, accompagnata da un vistoso rigonfiamento del fianco settentrionale del vulcano, causato dall'intrusione di un magma viscoso, che raggiunse il centinaio di metri.

Il 18 maggio, alle 8 e 32 del mattino, un terremoto di magnitudo 5 accompagnava il franamento dell'intero versante nord. La frana aveva un volume di 2,5 chilometri cubi e causò la decompressione del magma che si trovava a poca profondità, scatenando una gigantesca esplosione direzionale. In pochi secondi, un'ondata di materiale vulcanico si propagò a nord del vulcano, distruggendo tutto ciò che incontrava. Tuttavia, la furia si doveva ancora scatenare. La «scoperchiatura» del fianco e l'esplosione si ripercuotevano sul sistema di alimentazione profondo, e alla sommità del vulcano si formò una colonna eruttiva con un'altezza progressivamente crescente. La quota di 16-17 chilometri venne raggiunta intorno alle ore 12 del 18 maggio. Poi alle 12 e 17, insieme alla prima emissione di flussi piroclastici, l'altezza della colonna cominciò a diminuire, malgrado l'aumento del tasso di emissione. Verso le 16 e 30 si intensificò l'attività sismica con un numero crescente di terremoti localizzati a profondità maggiori di 5-6 chilometri. Ciò coincise con una momentanea ripresa della colonna eruttiva che raggiunse i 19 chilometri di altezza e segnò la fine dei flussi piroclastici. Poco dopo, l'attività eruttiva iniziò rapidamente a diminuire.

Nel 1981 la scienziata americana Susan Kieffer del Geological Survey degli Stati Uniti dimostrò che il franamento aveva innescato l'esplosione direzionale. Restava da dimostrare che la decompressione causata dal franamento era stata sufficiente anche a innescare la successiva fase esplosiva.

Abbiamo ipotizzato che il serbatoio magmatico posto alla profondità di 7 chilometri abbia subito una decompressione di 10 MPa (megapascal), corrispondenti a 100 atmosfere. È necessario avere un volume di magma di circa 20 chilometri cubi per ottenere, con questa decompressione, un aumento di volume di 0,25 chilometri cubi, corrispondente al magma eruttato. Queste dimensioni della camera magmatica si ottengono sia tramite il nostro modello sia attraverso stime precedenti basate sui dati sismici.

La decompressione istantanea ha provocato la formazione di bolle di gas nel magma contenuto nella camera; di conseguenza il suo volume è aumentato e una parte è stata espulsa. In base alla velocità di crescita delle bolle, abbiamo misurato la variazione del tasso di emissione del magma e lo abbiamo

Eruzione del 79 d.C. del Vesuvio. Come si può notare, la sequenza degli eventi vissuti dai due antichi testimoni - dettagliatamente narrata da Plinio il Giovane - può essere messa in correlazione con i parametri vulcanologici riportati nei grafici soprastanti.

confrontato con quello stimato dai dati sperimentali nel corso dell'eruzione. Vi è un buon accordo fra la curva teorica e i dati sperimentali, tranne che nel punto, corrispondente alla parte ombreggiata del grafico, in cui i dati sperimentali sull'altezza della colonna eruttiva sottostimano il flusso di magma, perché non tutto il materiale entra nella colonna, ma una parte forma i flussi piroclastici.

Con l'inizio dell'attività sismica profonda e il cedimento della camera magmatica cessano i flussi e si torna ad avere una colonna eruttiva sostenuta con un tasso di emissione prossimo a quello stimato teoricamente. Infine l'eruzione termina per il definitivo collasso delle pareti della camera magmatica che impedisce la fuoriuscita di nuovo magma.

L'eruzione del Vesuvio del 79 d.C.

Una volta provata la validità di questo modello fisico, lo abbiamo utilizzato per interpretare eruzioni esplosive del passato. Quella che più ci incuriosiva era, ovviamente, l'eruzione del Vesuvio del 79 d.C.

L'eruzione iniziò il 24 agosto con una colonna eruttiva sostenuta dalla quale ricaddero pomici, prima di colore bianco e poi grigie, che coprirono l'area a sud-est del vulcano. Successivamente, si formarono numerosi surge e flussi piroclastici che seppellirono le città di Ercolano, Pompei, Oplonti e Stabia. Dell'eruzione rimane la mirabile testimonianza delle due lettere scritte da Plinio il Giovane a Tacito per narrare le circostanze della morte dello zio, Plinio il Vecchio, salpato da Miseno per andare in soccorso degli abitanti dell'area vesuviana.

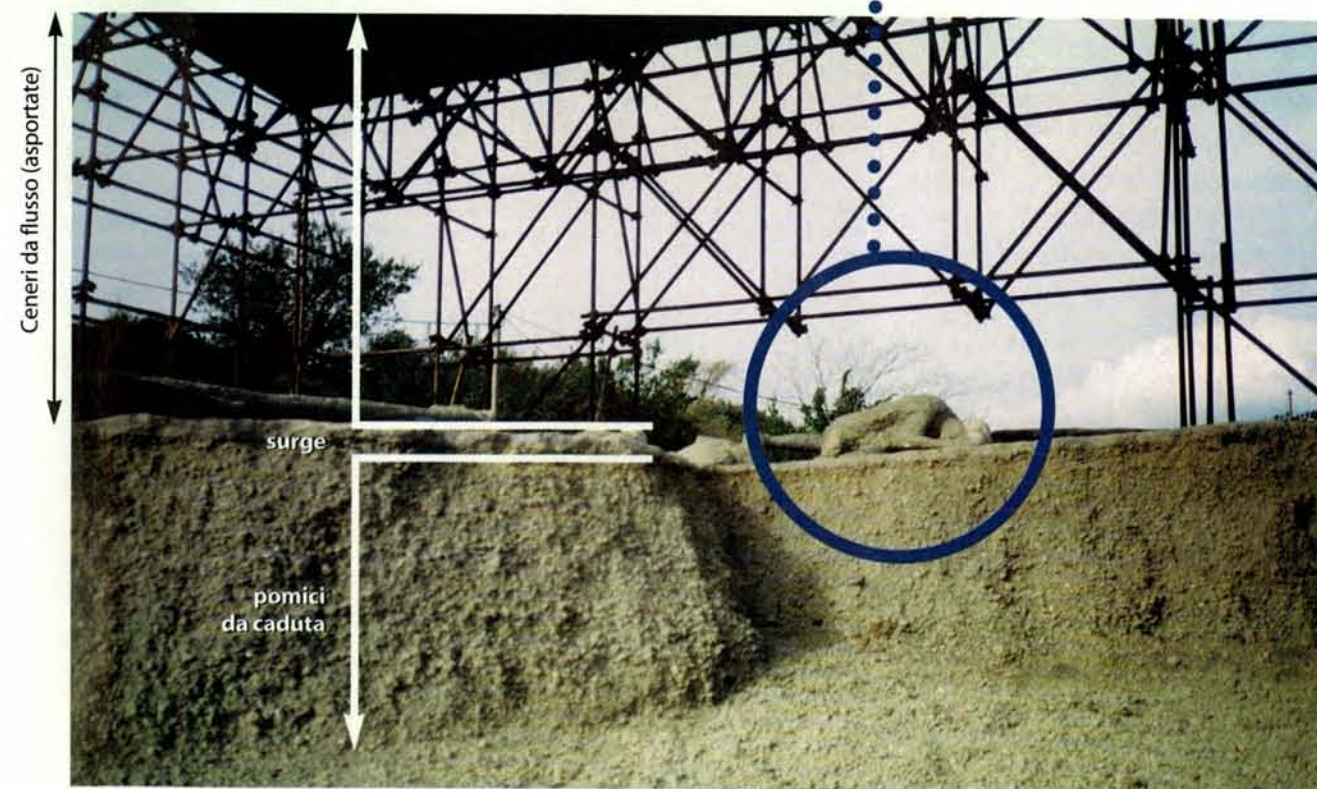
Il deposito di pomici è stato studiato nel 1973 da Lucio Lirer e Tullio Pescatore dell'Università di Napoli e da Basil Booth e George Walker dell'Università di Londra. Più recentemente, vari gruppi di ricercatori italiani e stranieri, fra cui Steve Carey e Harald Sigurdsson, hanno analizzato la distribuzione dei prodotti, stimando l'altezza massima raggiunta dalla colonna eruttiva.

Il nostro modello, confrontato con quei dati, non solo è risultato in accordo, ma ha anche verificato l'attendibilità della scansione temporale contenuta nel racconto di Plinio.

La variazione di pressione nella camera magmatica deve essere avvenuta in maniera progressiva. Ipotizzando su un volume di magma dell'ordine di 100 chilometri cubi una decompressione iniziale di 1 megapascal, che cresca progressivamente fino a 35 e che causi la vescicolazione e l'emissione progressiva di 4 chilometri cubi di magma (volume stimato da Carey e Sigurdsson), si ottiene una durata dell'intero processo eruttivo di circa due giorni e mezzo.

Per correlare il nostro modello con il racconto di Plinio dobbiamo trovare

Queste fotografie confermano il racconto dell'eruzione del Vesuvio testimoniata da Plinio il Giovane. Le vittime giacciono sopra le pomici - il materiale emesso per primo dal vulcano - e sono coperte dai depositi dei flussi.

Foto: Lisetta Giacomelli

un evento descritto nelle lettere che abbia un preciso significato fisico. Quest'evento è la transizione tra la fase a colonna sostenuta e la generazione di flussi piroclastici. A nostro avviso, Plinio il Giovane descrive questo passaggio quando «quel nembo discende sulle terre, copre la distesa del mare. Avvolse Capri e la nascose». È il giorno successivo all'inizio dell'eruzione e i fatti narrati avvengono poco tempo dopo che «già il giorno era nato da un'ora e la luce era ancora incerta e quasi languiva». Il 25 agosto il Sole sorge alle 6 e 25 e l'orario indicato da Plinio è qualche tempo dopo le 7 e 30 del mattino.

In questo momento la colonna raggiunge la sua massima altezza di 32 chilometri, come stimato da Carey e Sigurdsson, con un tasso di emissione da noi stimato di 240 milioni di chilogrammi al secondo. Poco dopo la sua quota diminuisce con l'emissione dei flussi. Questo dato, messo in correlazione con l'ora ricavata dalla descrizione di Plinio, ci fornisce molte altre informazioni: andamento del tasso di emissione, variazioni della pressione all'interno del serbatoio magmatico, volume totale emesso e dati sulla fase di transizione dalle pomici bianche alle pomici grigie.

Il magma eruttato mostra una variazione nella composizione chimica rivelata dal colore delle pomici, che sono bianche all'inizio e grigie successivamente. Il volume totale delle pomici bianche è di 1 chilometro cubo. In corrispondenza di questo valore possiamo stimare il tasso di emissione nel momento di transizione e la corrispondente massima altezza della colonna, che risulta di 24 chilometri. Questa altezza è uguale a quella stimata da Carey e Sigurdsson.

Possiamo sincronizzare gli eventi narrati da Plinio con la dinamica dell'eruzione. Il momento in cui vede la nube da Miseno - «la sua forma era simile a un pino più che a qualsiasi altro albero» - corrisponde alle ore 13 del 24 agosto e l'altezza è compresa fra 13 e 17 chilometri. Valutando il tempo necessario a Plinio il Vecchio per mettere in mare le quadriremi, egli deve essere arrivato a Stabia fra le 17 e le 20. Nella notte, il giovane Plinio rimasto a Miseno viene svegliato dai terremoti che accompagnano l'emissione delle pomici grigie. A Stabia «il cumulo di cenere e lapilli aveva tanto accresciuto il suo livello che egli, se avesse indugiato nella stanza, non sarebbe potuto uscire più (...) La casa infatti vacillava per frequenti e violente scosse di terremoto». Questi eventi costringono Plinio il Vecchio a fuggire verso la spiaggia, ma la fuga via mare è preclusa per il vento contrario. Egli si getta a terra e chiede dell'acqua quando «già altrove era giorno, lì era notte: una notte più nera e più fitta di tutte le notti».

La morte di Plinio il Vecchio sopraggiunge insieme all'arrivo dei flussi di cenere: «all'istante stramazzò al suolo, per quanto io possa inferire, perché il respiro fu ostruito da una nebbia sempre più densa e la gola si occluse». La nebbia che lo ha avvolto è la nube di cenere che si forma durante la propagazione di un flusso piroclastico.

I flussi si sono formati fra le 7 e 30 - 8 e le 10 e 30 del 25 agosto. Questa fase dura un tempo breve, inferiore a quanto si riteneva precedentemente osservando lo spessore dei depositi, perché aumenta il tasso di emissione e i prodotti si accumulano in rapida successione. La maggior parte delle vittime e delle distruzioni di Pompei, Ercolano, Oplonti e Stabia avviene in questa fase.

A distanza di duemila anni, quella tragedia ci testimonia che le fasi più pericolose di un'eruzione esplosiva possono essere rapide, ma anche che possono verificarsi molte ore dopo l'inizio dell'eruzione. Ogni particolare che migliori la conoscenza di questi eventi può essere determinante per la predisposizione dei piani di evacuazione nel caso di risveglio dei vulcani quiescenti.

Da: Giorgio Sommer, fotografo a Napoli, Ed. Electa

La fotografia mostra il Vesuvio durante l'eruzione del 24-30 aprile 1872. Il pino vulcanico raggiungeva un'altezza di cinque chilometri.

ROBERTO SCANDONE, geofisico, è stato ricercatore presso l'Osservatorio Vesuviano di Ercolano e professore associato presso l'Università «Federico II» di Napoli. Attualmente insegna fisica presso l'Università di Roma Tre. Per sette anni è stato *editor* del «Journal of Volcanology and Geothermal Research».

LISETTA GIACOMELLI, geologa, ha studiato l'attività dei vulcani napoletani e di Ventotene. Attualmente si occupa di divulgazione e collabora alla creazione di siti Internet sulla vulcanologia e la geologia.

SCANDONE R., *Factors Controlling the Evolution of Explosive Eruptions*, in «Journal of Volcanology and Geothermal Research», 72, pp. 71-83, 1996.

SCANDONE R. e GIACOMELLI L., *Vulcanologia: principi fisici e metodi di indagine*, Liguori, Napoli, 1998.

Siti Internet di vulcanologia:

Fisica del vulcanismo, Università «Roma Tre», http://vulcan. fis.uniroma3.it

Gruppo nazionale di vulcanologia: http://www.dst.unipi.it/gnv/index.html

Le mummie di Baharyia

La scoperta della più vasta necropoli dell'antico Egitto, a lungo tenuta segreta per proteggerla da sciacalli e archeologi stranieri, potrà gettare luce sulla vita quotidiana di quella grande civiltà

Testo di Alina Ungureanu, foto di Philippe Plailly/Eurelios

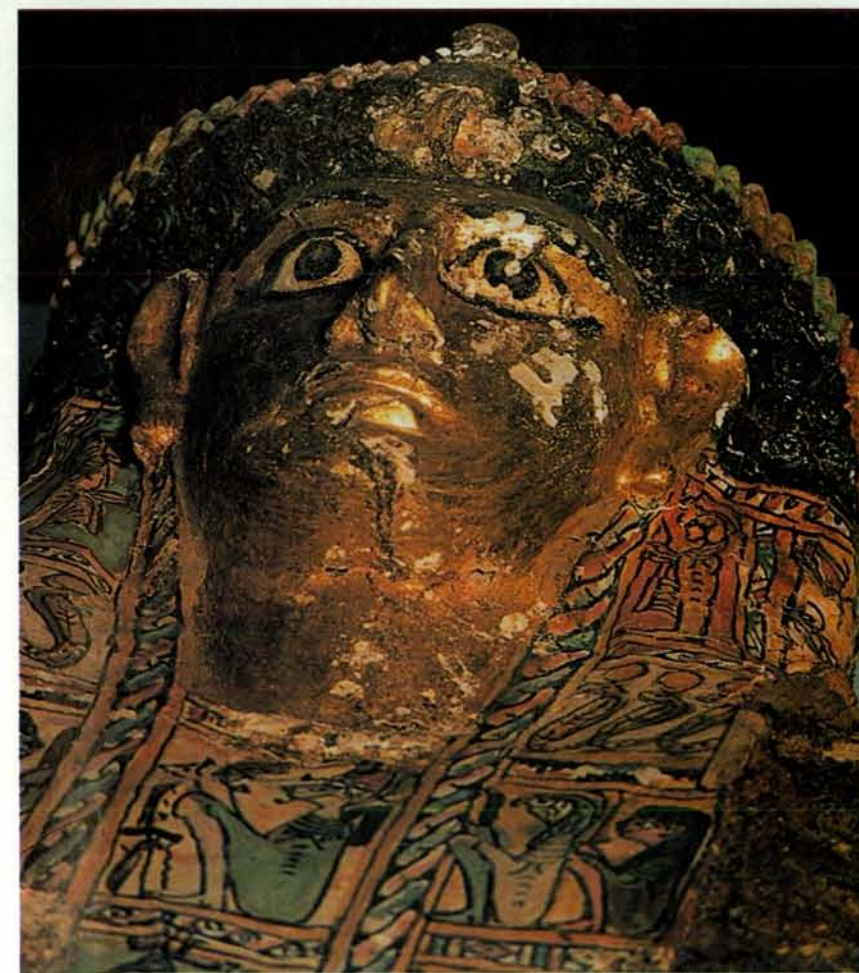
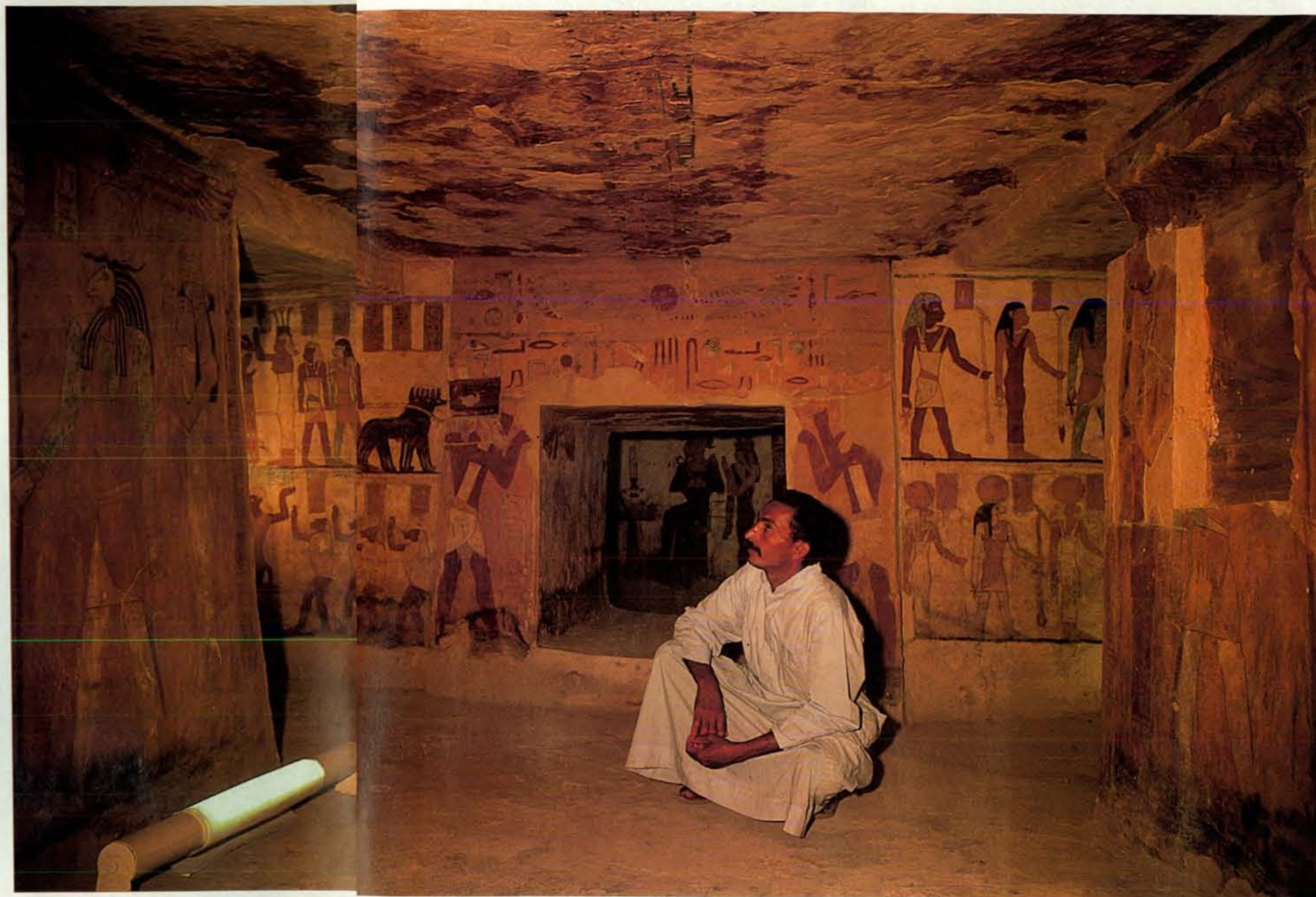
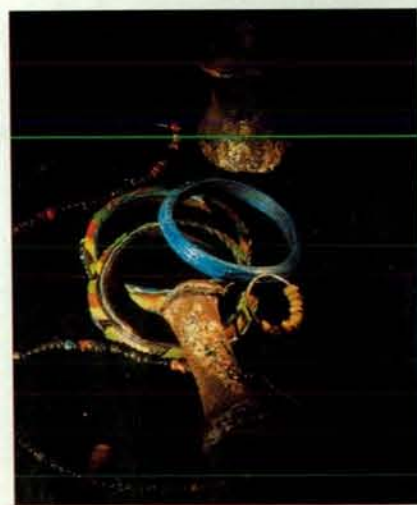
Gli scavi di Baharyia hanno già portato alla luce oltre duecento sepolture contenenti mummie di persone appartenenti ai più diversi stati sociali. Gli archeologi egiziani, gli unici ad avere il permesso di ricerca nel sito, stimano peraltro che le tombe possano essere diverse migliaia.

L'oasi di Baharyia dista appena 450 chilometri dal Cairo. Per raggiungerla, percorrendo la strada asfaltata che porta a Fayoum non ci si mette più di quattro ore. È fertile, Baharyia, anche se non piove da anni, a meno di un miracolo raro e improbabile. «Ma sarebbe un disastro, per le tombe che sono già state scavate» si affretta a commentare Mohammed Tajeb, uno degli ispettori delle antichità di Baharyia. È grazie alle sue sorgenti d'acqua - molte delle quali sono di natura termale - che meloni, angurie, pomodori e prugne, limoni deliziosi e grandi come arance nascono in questo terreno argilloso, ricco di un bel pigmento giallo ocra. Ma una più recente fonte di reddito, le innumerevoli tombe stipate di magnifici sacrofagi e mummie dorate, fa fiorire gli affari nell'oasi di Baharyia.

Lo scorso anno, tra aprile e maggio, ad appena sei chilometri da Bawiti, il capoluogo di Baharyia, è stata scoperta un'enorme necropoli: qualcosa come 10 000 mummie, secondo le autorità egiziane. Se le stime, davvero impressionanti, fossero confermate dagli scavi, che si protrarranno per diversi anni, si tratterebbe della più grande necropoli dell'antico Egitto che sia mai stata rinvenuta. La maggior parte delle tombe non sembra aver subito saccheggi e, inoltre, sembra di poter attribuire le mummie a tutti gli strati sociali, il che permetterebbe una vasta ricerca sulla popolazione dell'antico Egitto durante le dinastie tolemaiche e nell'epoca dell'occupazione romana.

La scoperta, a dire il vero, risale al 1996, ma è stata tenuta sotto silenzio per il tempo necessario a mettere insieme un'agguerrita équipe formata rigorosamente da archeologi egiziani. Alla sua guida c'è Zahi Hawass, direttore dell'area archeologica di Giza (da cui dipende Baharyia): quasi un moderno principe che regna su numerose piramidi e sui milioni di turisti che ogni anno le prendono d'assalto.

Nella sua versione meno articolata,

Al centro della corona che cinge questa maschera mortuaria in gesso e oro, che copriva il viso della mummia di un giovane uomo, spicca l'effige di un'aquila.

Sopra, alcuni vasi istoriati che contenevano vino. A sinistra, la mummia di un bambino di un mese. Sotto, alcuni monili e due vasi per la raccolta delle lacrime dei congiunti. Sulle pareti affrescate di una tomba risalente alla XXVIII dinastia (*a destra*) sono raffigurate, tra l'altro, le varie fasi del procedimento per la mummificazione delle salme.

la leggenda della scoperta vuole che il merito vada attribuito alla proverbiale indisciplina di un asino. Cercando di recuperare il suo intraprendente somaro dal crepaccio in cui si era cacciato, il proprietario dell'animale si sarebbe ritrovato faccia a faccia con una mummia scintillante d'oro.

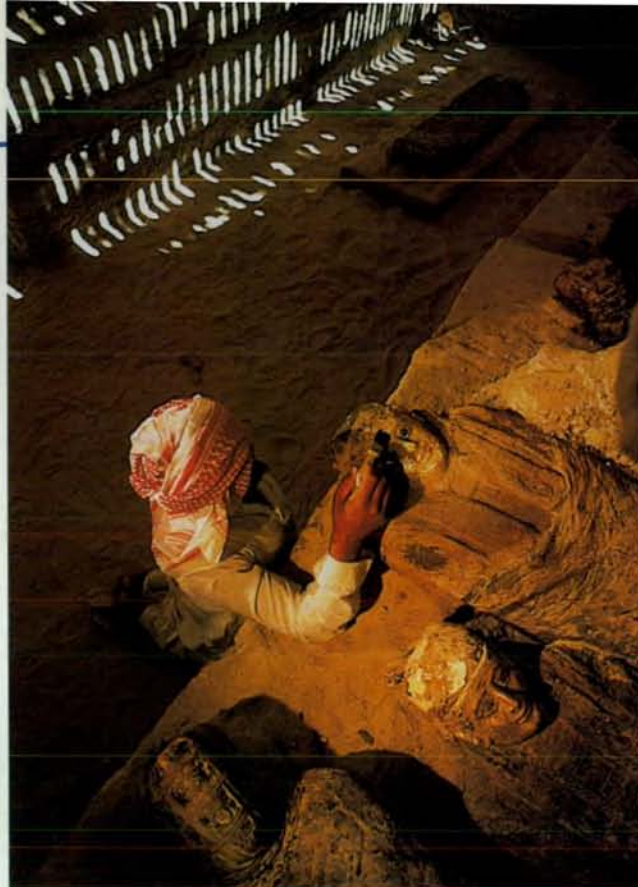
Le mummie estratte dalle loro tombe nel 1999, due uomini, una donna e due bambini ricoperti di maschere d'oro e pettinati alla moda greco-romana, hanno avuto una imponente copertura mediatica. Come un trofeo, sono state esposte, opportunamente protette da campane di vetro, in un edificio dell'amministrazione locale, improvvidamente ribattezzato «il museo». Per Zahi Hawass era la grande scoperta, attesa per tutta una vita e capace di farlo passare alla storia. Per Baharyia era l'inizio di un nuovo commercio: «il miraggio della mummia d'oro.»

Da quel momento, a Baharyia sono spuntati come per incanto tre alberghi. Così, in pochi mesi. Con tanto di stanze da bagno, patio e piccoli bungalow. Ci vuole poco a indovinare, dietro queste costruzioni improvvise, la mano di imprenditori lungimiranti, che già intravvedono il business di un fiorente turismo. Il primo dei tre alberghi, El Beshmo, costruito proprio sull'onda della scoperta per accogliere - si direbbe - il fiume dei rappresentanti della stampa mondiale che si era catapultato sul posto, è ormai diventato la seconda residenza ufficiale di Zahi Hawass. Durante gli scavi, El Beshmo ha tutta l'aria di una gigantesco convegno internazionale della stampa, dove si è dato appuntamento tutto il bel mondo del giornalismo.

Superato lo stordimento dei chilometri di deserto che hanno custodito fino a oggi le mummie dorate di una popolazione del V secolo a.C., e quello degli hotel per i futuri turisti (che contrastano le abitazioni, ben più sobrie, per le guardie che restano giorno e notte a vegliare le tombe), la prima cosa che viene proposta è un libro. Scritto, naturalmente, dal dottor Hawass - in perfetto stile da *instant book* americano - ha avuto prenotazioni per qualcosa come 300 000 copie, prima ancora di arrivare in libreria.

Ma tutto questo non era che l'ouverture, ben orchestrata, di una sinfonia in grande stile: «Baharyia, ovvero come passare al setaccio la sabbia del deserto». Già, perché oggi nell'oasi sono aperti contemporaneamente almeno quattro scavi. Al chilometro 6, sull'ormai celebre sito delle mummie dorate; più lontano, al chilometro 7, sulla parte della necropoli che sembra essere stata riservata ai dignitari e alla classe sociale benestante dell'epoca - e dove è stato evacuato un intero villaggio per lasciare spazio agli archeologi - e poi ancora... No, non si può dire. Anzi, nemmeno lo si sa. Gli altri siti di scavo resteranno coperti dal segreto finché non sarà conclusa la campagna di scavo di quest'autunno. Hawass è un maestro nel preparare colpi di scena per tenere desta l'attenzione della stampa su Baharyia, senza darsi alcuna preoccupazione per l'irritazione della stragrande maggioranza degli egittologi di tutto il mondo, offesi dal fatto che nessun altro specialista, se non quelli egiziani, sia stato invitato sul luogo.

Le riprese degli scavi di aprile-maggio 2000 sono state cedute in esclusiva alla Fox. Il network televisivo statunitense, con cui Hawass aveva già organizzato una diretta in visita alla piramide di Cheope, si è assicurato uno

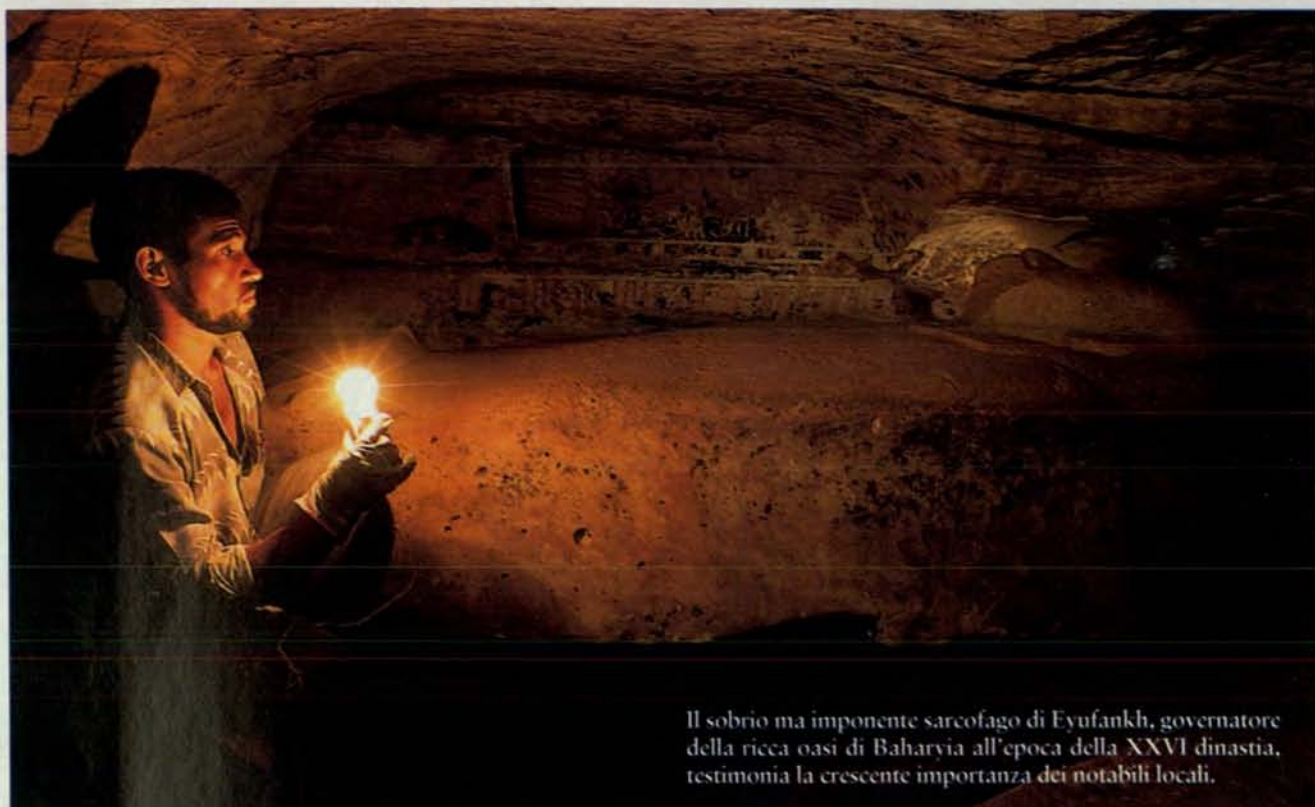
Un'équipe del Centro nazionale delle ricerche del Cairo sta eseguendo studi di paleomedicina sulle mummie venute alla luce: anche in questo settore il sito di Baharyia offre un'opportunità unica al mondo. A destra, una fase degli scavi.

show unico: *New Mummies Discovery Alive*. Per l'occasione, è stata messa insieme un'équipe di dimensioni colossali, come solo gli americani sanno fare: antenne satellitari, cucine da campo, cameramen, e come presentatore l'attore Bill Pullman, il Presidente degli Stati Uniti nel film *Indipendence Day*. Per non correre rischi, la Fox ha scomodato, per avere la «panchina lunga» come una squadra di calcio che si rispetti, un team di cameramen *free lance* israeliani e uno della catena televisiva egiziana Video Channel. Per due settimane tutti gli asini di Baharyia sono rimasti sequestrati sul sito nel ruolo di comparse. E, con loro, anche i legittimi proprietari.

Per l'occasione, Zahi Hawass ha estratto anche un asso dalla manica: scavi simultanei sul sito delle mummie dorate e a Sheikh Subi, un sito scoperto già mezzo secolo fa dal padre dell'archeologia egiziana, Ahmed Fahkry, che vi aveva rinvenuto una necropoli risalente all'epoca della XXVI dinastia, l'ultimo periodo di profondi rivolgimenti del grande impero egizio. A quell'epoca, compresa tra il 535 e il 332 a.C., nella politica egizia assunsero grande importanza i governanti locali, che conquistarono via via rilevanti quote di potere. A Sheikh Subi, Ahmed Fahkry aveva scoperto, nel 1930, un labirinto di 100 metri, e le sepolture di tre nobili: Bedashtar, Tathay e Tanefertbastit, membro della corte e della famiglia di Ged Khonsu Eyufankh, il potente governatore dell'oasi. Nei suoi scritti Fahkry aveva affermato che anche la tomba del dignitario non poteva che trovarsi in quell'oasi, ma purtroppo non era mai riuscito a individuarne la collocazione.

La fortuna ha voluto che l'onore della scoperta toccasse di nuovo a Zahi Hawass, e che alla Fox spettasse in esclusiva mondiale di far scivolare la telecamera nel piccolo foro praticato nel muro della tomba. Una fine polvere ocra si spande nella camera mortuaria, dalla quale si libera un odore pestilenziale. Eyufankh aveva ordinato che il suo sarcofago fosse ricoperto di questo pigmento per facilitare la sua ascesa verso il cielo. E aveva fatto disporre nella tomba una notevole quantità di ematite - che, polverizzata, emana un odore intenso e sgradevole - per scoraggiare i tentativi di profanazione del sepolcro. E in un tempietto che aveva fatto costruire per la sua famiglia ad Ain-el Moftala, un altro sito di Baharyia, Eyufankh si era fatto rappresentare come solo ai re era concesso. Nella sua tomba, lo si vede negoziare con Osiride, Anubi e Iside il suo posto nell'altro mondo. E il suo sarcofago è una magnifica opera di basalto, un materiale introvabile nell'oasi.

Zahi Hawass ha avanzato l'ipotesi che, fatto costruire quando il governatore era in vita, il sarcofago sia stato trasportato prima lungo il Nilo, e poi per 300 chilometri, nel deserto, fino alla sua destinazione finale. Pesa la bellezza di 12 tonnellate, ed è di una semplicità estrema: un ritratto del governatore scolpito con poche linee, quasi un'opera d'arte contemporanea, e una lunga stola che scende dal collo fino ai piedi. Incise nella pietra, tutte le sue funzioni di alto dignitario del faraone e la sua ascendenza - inclusa quella divina di cui si faceva vanto - ne sottolineano l'alto lignaggio.

Una quindicina di chilometri più lontano, dove il deserto torna a farla da padrone, un vero formicaio umano sta portando alla luce una tomba dopo l'altra. Delle 10 000 mummie promesse lo scorso anno, dopo un'intera stagione di scavi ne sono state rinvenute solo 205, e gli archeologi egiziani prevedono vent'anni di scavi per portare alla luce tutti i tesori della necropoli.

Ma le conclusioni che se ne possono trarre sono già importanti. Baharyia sembra aver conosciuto, all'epoca greco-romana, una gloria e una popolazione che superavano di gran lunga quelle attuali. Roccaforte contro gli attacchi provenienti dall'Occidente, produttrice di vini pregiati e magazzino dell'impero, l'oasi ebbe un'esplosione demografica in età ellenistica. I funzionari nominati durante le dinastie tolemaiche furono rispettosi nei confronti della cultura egizia, soprattutto verso il panteon delle divinità della popolazione locale.

Il sobrio ma imponente sarcofago di Eyufankh, governatore della ricca oasi di Baharyia all'epoca della XXVI dinastia, testimonia la crescente importanza dei notabili locali.

Affascinati dai costumi mortuari egiziani, i greci - e poi i romani - li adottano. Così, almeno, attestano senza dubbi le tombe rinvenute nella vallata. Vi si può leggere la composizione, estremamente eterogenea, della popolazione dell'oasi: non si trattava certo di un piccolo nucleo di genti locali, ma piuttosto di gruppi provenienti da ogni angolo dell'impero. Le tombe appartengono, ovviamente, a egiziani, ma anche a greci, nubiani e - più tardi - romani. Anche i cristiani vi fanno la loro apparizione, e vi si trovano, per la prima volta, tombe a forma di croce copta.

Durante quel periodo, i riti mortuari divengono meno cruenti. Le viscere non vengono più estratte dal corpo per essere messe in un vaso, con spezie e vino, da disporre alla testa della mummia, e i sarcofagi si fanno rari: i corpi mummificati vengono coperti con una maschera che nasconde la testa e il petto del defunto. Le rappresentazioni del morto e degli dei, in precedenza molto precise e ricche di dettagli, acquistano in poesia. Sulla maschera che ricopre il petto di una delle mummie si vede una delle prime rappresentazioni dell'anima del defunto, nell'atto di prendere il volo. Ed è interessante ricordare come l'Egitto classico non avesse alcuna dimestichezza con il concetto di «anima», almeno nel senso in cui è stato successivamente sviluppato dal cristianesimo.

Quest'anno Zahi Hawass ha fatto trasportare sul sito una sofisticata apparecchiatura per radiografare le mummie. Ma non può essere solo per il desiderio di curiosare nelle caratteristiche anatomiche di quegli antichi egizi. Si scopre così che il vero interesse è un altro. Le mummie delle madri sepolte con i figli mummificati posati sul petto sono davvero toccanti. Quella di un bambino di appena un mese di età ha rivelato, all'indagine radiografica, la presenza di un Horus d'oro sulla fronte del piccolo, messo lì durante la mummificazione.

Se il senso di questo rituale resta oscuro, non è certo l'unico mistero: la presenza stessa di numerosissime mummie di bambini incuriosisce gli archeologi. A dare una spiegazione di una così elevata mortalità infantile potrebbe però essere semplicemente l'eccessiva ricchezza in ferro dell'acqua dell'oasi. Ma per dare una risposta a questo interrogativo occorreranno tecniche di indagine più moderne, magari la stessa analisi del DNA.

«L'egittologia non è una scienza del secolo scorso» afferma con orgoglio Zahi Hawass. «E gli archeologi hanno portato a termine, in Egitto, meno della metà del lavoro necessario per fare luce su una civiltà così importante. Bisogna capire che le Piramidi e la Sfinge, sebbene restino monumenti emblematici di una storia lunga e gloriosa, ci dicono ancora poco a proposito di questa straordinaria civilizzazione.»

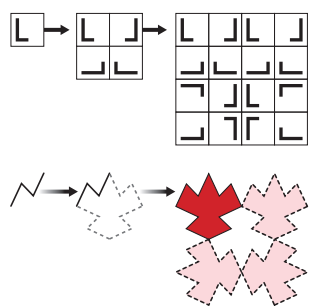
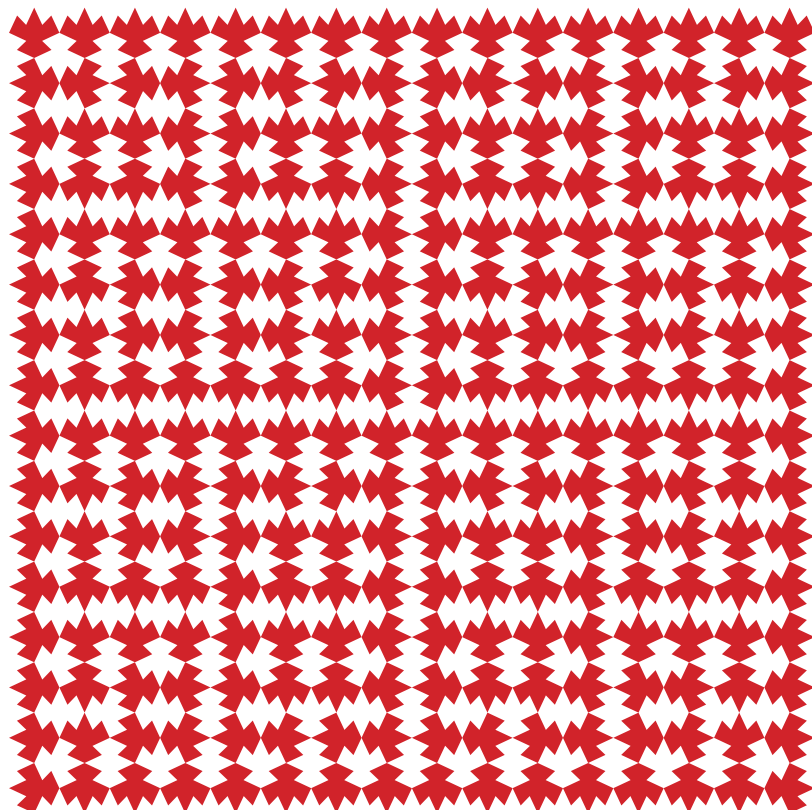
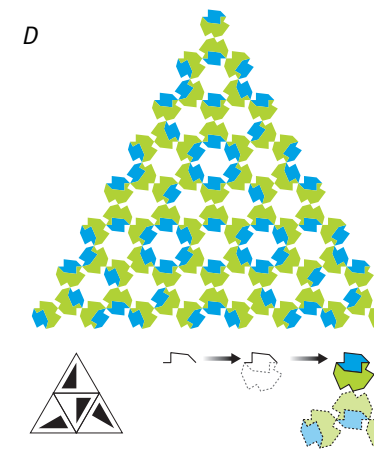
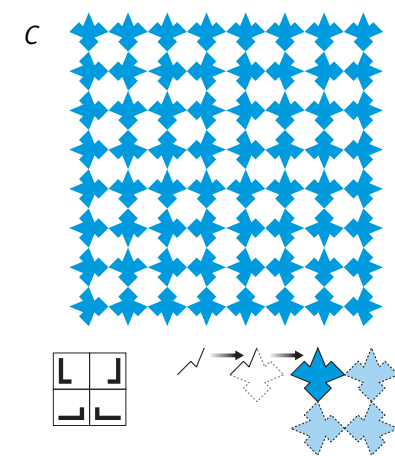
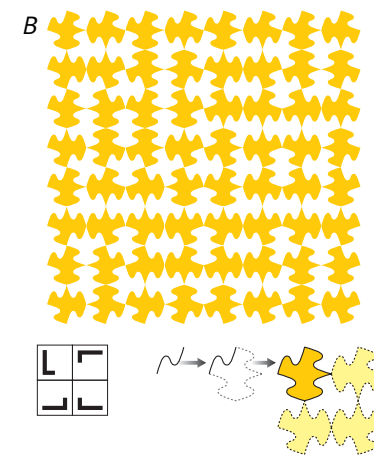
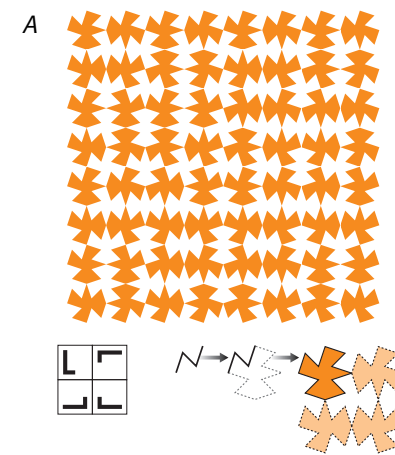
A Baharyia, i turisti si mettono sulle orme dei giornalisti che godono dei favori del dottor Hawass, o stanno di guardia a sei chilometri dall'oasi, là dove si trova il sito delle mummie, nella speranza di poter almeno gettare uno sguardo su quelle tombe, quando finalmente il bel mondo dei media se ne sarà disinteressato. Ma, almeno sotto questo aspetto, Zahi Hawass ci tiene, alle formalità. Il sito non sarà accessibile ai turisti. «È un cimitero. E anche se questi morti hanno lasciato questo mondo più di 2000 anni fa, bisogna rispettare le credenze che hanno dato origine alla costruzione di queste magnifiche sepolture. Finalmente, abbiamo denaro a sufficienza per sistemare come si deve il museo di Baharyia. Alla fine dell'anno i turisti potranno vedere le cinque mummie che vi sono state depositate e vi saranno esposti anche gli ornamenti funebri di cui erano coperta.» Per la cifra, non indifferente, di 30 000 lire a visitatore. ❑

di IAN STEWART

Tassellare il piano

Le tassellature sono da molto tempo uno degli argomenti preferiti dalla matematica ricreativa. In genere si deve partire da una o più forme prefissate - i tasselli - e disporle l'una accanto all'altra in modo da coprire tutto il piano, o almeno una gran parte di esso. Diversi artisti hanno utilizzato questo metodo per creare splendidi disegni, di cui ho già presentato alcuni esempi (si veda l'articolo *Tassellature e origami* in «Le Scienze» n. 371, luglio 1999). Non molto tempo fa un lettore di questa rubrica, Michel Châtelain di Prilly, in Svizzera, mi ha fatto conoscere un metodo completamente diverso, in cui la forma del tassello emerge solo alla fine. Nel nuovo procedimento determiniamo innanzitutto il modo in cui i tasselli devono unirsi l'uno all'altro, e poi individuiamo la forma del tassello più adatta.

Per descrivere questo metodo la cosa migliore è fare qualche esempio. Pensiamo, tanto per cominciare, a un singolo quadrato. Si può tassellare il piano con quadrati - come si fa con le piastrelle del bagno - ma noi vogliamo introdurre una piccola variante. L'illustrazione qui sotto mostra come unire quattro quadrati in un quadrato più grande, ma ho aggiunto alcune forme a L per far vedere che uno dei quattro tasselli è stato traslato (cioè semplicemente fatto scivolare di lato) e che gli altri tre sono stati ruotati o riflessi (cioè l'orientazione del tassello è stata rovesciata come in uno specchio) o entrambe le cose. Rotazioni, riflessioni e traslazioni sono chiamate nell'insieme trasformazioni e costituiscono i modi in cui si può muovere il quadrato nel piano. Se ripetiamo le stesse quattro trasformazioni sulla figura formata da quattro quadrati, otteniamo la configurazione a 16 quadrati che si vede nell'illustrazione. (La figura a 4 quadrati diventa il quarto superiore sinistro del quadrato più grande, e le rotazioni e riflessioni della figura generano gli altri tre quarti.)

Si può ripetere questo procedimento per ottenere figure con 64 quadrati, con 256 e così via. Inoltre ciascuna di queste configurazioni diventa parte della successiva, sicché l'intera successione di tassellature può dare origine a un'unica configurazione infinita. A seconda di come si compie questa operazione, il risultato può essere la tassellatura dell'intero piano o di una sua parte infinitamente grande. Per esempio, se si inserisce sempre ciascuna tassellatura nell'angolo in alto a sinistra di quella vicina, si tassella un quadrante infinito: un quarto del piano. Se la si inserisce alternatamente in alto a sinistra e in basso a destra, si riesce a tassellare l'intero piano. Come si può tassellare metà del piano (due quadranti adiacenti)?

Il nuovo metodo di tassellatura parte da una figura formata da 4 quadrati (in alto) in cui il quadrato in alto a sinistra è traslato (fatto scivolare di lato), quello in alto a destra è riflesso, quello in basso a sinistra è ruotato e quello in basso a destra è sia ruotato sia riflesso. Si possono ripetere le stesse trasformazioni per formare una figura con 16 quadrati. Applicando le trasformazioni a una curva a forma di N, il risultato è un tassello a forma di uccello (sopra) con cui si può generare la configurazione a destra.

Si può produrre una grande quantità di configurazioni cambiando i punti di partenza del procedimento di tassellatura. Se si applicano differenti trasformazioni al generatore a forma di N, il tassello e la configurazione saranno diversi (A). Se si applicano quelle trasformazioni a una curva differente, la configurazione sarà la stessa, ma il tassello risulterà diverso (B). Con questo metodo si può generare a volte più di una forma di tassello (C). Si possono anche usare triangoli equilateri per specificare le trasformazioni (D). Se si applicano al generatore le rotazioni mostrate nella figura con 4 triangoli, si ottengono tasselli che uniti formano una configurazione triangolare.

Ma i quadrati con un segno a forma di L non sono davvero i tasselli che vogliamo: sono solo sostituti scelti per mostrare l'insieme di trasformazioni che daranno origine alla tassellatura finale. Per trovare un tassello di forma adatta alle trasformazioni scelte, prendiamo un «generatore»: una curva che va dall'angolo inferiore sinistro del quadrato di partenza all'angolo superiore destro. (Questa condizione garantisce che la forma del tassello sia chiusa.) La curva che si vede nell'illustrazione è una spezzata a forma di N. Ora applichiamo a questo generatore le stesse quattro trasformazioni che abbiamo utilizzato per le figure quadrate, ponendo la curva di partenza nell'angolo superiore sinistro e ruotandola e riflettendola per produrre tre curve che si uniscono.

Con questo particolare generatore, otteniamo un tassello con una forma che ricorda un uccello o forse una figura umana con mantello e cappuccio. Comunque sia, si possono ora applicare ripetutamente le trasformazioni a questo tassello, come se si trattasse del quadrato originale. Il risultato è un modo per ricoprire una qualsiasi parte del piano con un numero infinito di copie di questo interessante tassello.

Le illustrazioni in alto in questa pagina mostrano altre tassellature prodotte con lo stesso metodo. Se viene usato il generatore a forma di N ma con un insieme differente di quattro trasformazioni, si ottiene un diverso tassello e una diversa configurazione (*si veda l'illustrazione A*). Se poi si cambia la forma del generatore, si ricavano tasselli differenti che si uniscono nella stessa configurazione (*illustrazione B*). Si noti che alcuni generatori portano a numerose forme di tassello (*illustrazione C*).

Per inciso, di solito le configurazione prodotte sono aperiodiche: non sono semplici ripetizioni di una forma, come nel disegno di una carta da parati. Ma se l'insieme di trasformazioni comprende solo traslazioni (cioè non ci sono rotazioni o riflessioni), si possono ottenere anche tassellature periodiche. È sufficiente disegnare una figura con quattro quadrati in cui le L hanno tutte la stessa orientazione: qualsiasi tassellatura prodotta da queste trasformazioni sarà periodica.

Si può anche iniziare il procedimento di tassellatura utilizzando altre unità di base che non siano un quadrato. In effetti, si può impiegare qualsiasi tassello di forma tale per cui, unendone diverse copie, si ottiene un tassello più grande esattamente della stessa forma (questi tasselli sono chiamati, con un gioco di parole intraducibile in italiano, *rep-tile*). Un triangolo equilatero, per esempio, è un rep-tile, dato che unendone quattro copie si ottiene un triangolo equilatero più grande, e può generare configurazioni molto interessanti (*si veda l'illustrazione D*).

Forse i lettori saranno in grado di inventare tassellature simili; nessuno è ancora riuscito a trovare un metodo per generare tutti i possibili rep-tile, e quindi c'è ancora ampio spazio per nuove scoperte.

Lo stesso metodo funziona anche per le tre dimensioni: per esempio, otto cubi fatti combaciare danno origine a un cubo di grandezza doppia, sicché il cubo è un repliedro. (Mi sono appena inventato questo nome.) Si possono addirittura creare tasselli frattali: forme divisibili in parti che riproducono in piccolo l'intero. Il procedimento di tassellatura descritto da Châtelain si basa in effetti su alcuni dei metodi utilizzati per costruire frattali. È un modo deliziosamente semplice per produrre disegni di meravigliosa complessità. ❏